



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**EXPERIMENTÁLNÍ KOMORA PRO TESTOVÁNÍ
SPECIÁLNÍCH MATERIÁLŮ TECHNOLOGIÍ SLM**

EXPERIMENTAL CHAMBER FOR TESTING OF SPECIAL MATERIALS USING SLM TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Malý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Martin Malý**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální komora pro testování speciálních materiálů technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další průmyslově zpracovávané komponenty. Vyhřívání pracovního prostoru je standardně omezeno do 200 °C, což je pro zpracování některých pokročilých materiálů zásadním způsobem limitující.

Typ práce: vývojová - konstrukční

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je konstrukční návrh demontovatelné experimentální komory pro zařízení SLM280HL s těmito parametry: samostatné vyhřívání min do 400 °C, vestavěný systém pro nanášení vrstev, rozměry výrobitelného dílu min. 50 x 50 x 50 mm.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat zástavbové možnosti a definovat koncepce řešení,
- zkonstruovat vyhřívanou komoru s nanášecím zařízením,
- analyzovat rozložení teplot a použitelné materiály,
- realizovat funkční vzorek vyhřívané komory,
- ověřit funkčnost navrženého systému vyhřívání.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální

data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam literatury:

MERCELIS, Peter a Jean-Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal [online]. 2006, 12(5), 254-265. DOI:

10.1108/13552540610707013. ISSN 1355-2546. Dostupné z:

<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540610707013>

KEMPEN, Karolien, et al. Lowering thermal gradient in selective laser melting by pre-heating the baseplate [online]. Austin: KU Leuven, 2013. Dostupné z:

https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/410783/1/Karolien+Kempen_SFF2013.pdf

LIU, Qi, et al. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2015, 222(8), 61-74. DOI:

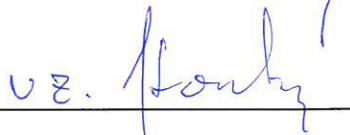
10.1016/j.jmatprotec.2015.02.036. ISSN 0924-0136. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615000862>

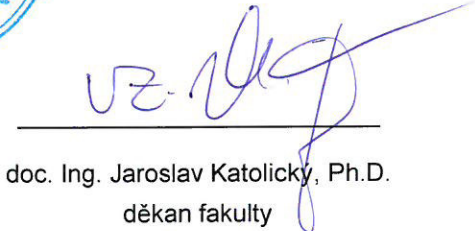
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016





prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou vlivu procesní teploty a tlaku na 3D tisk metodou Selective Laser Melting. Cílem práce je konstrukční návrh, výroba a testování vyhřívané experimentální komory pro tiskárnu SLM 280HL od společnosti SLM Solutions. Hlavním úkolem experimentální komory je zvýšení teploty předehřevu práškového lože z původních 200 °C minimálně na teplotu 400 °C. Zařízení bude sloužit pro výzkum vlivu vysoké procesní teploty na vlastnosti tisknutých materiálů. Práce se také zabývá návrhem nanášedce prášku do zvýšených teplot.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, procesní parametry, teplota, tlak, vyhřívání, nanášení prášku

ABSTRACT

The thesis deals with the influence of process temperature and pressure on 3D printing using Selective Laser Melting. The aim of the thesis is the design, manufacture and testing of the experimental chamber for SLM 280HL from company SLM Solutions. The main task of the experimental chamber is to increase the temperature of the preheating of the powder bed from the original 200 °C to at least at 400 °C. The device will be used to investigate the influence of high process temperature on the properties of printed materials. The thesis also deals with the design of the powder applicator for elevated temperatures

KEY WORDS

Selective laser melting, proces parameters, temperatute, preassure, heating, recoater

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÝ, M. *Experimentální komora pro testování speciálních materiálů technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D., za cenné rady a odborné vedení mé diplomové práce. Další děkuji patří Ing. Michalu Holému za podporu při výrobě součástí experimentální komory. Závěrem děkuji celé mé rodině a všem, kteří mě po celou dobu studia podporovali a motivovali.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Daniela Koutného, Ph.D. s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....

Podpis

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Vliv výrobních parametrů na zpracování materiálů technologií SLM	15
2.1.1	Vliv předehřevu	15
2.1.2	Vliv tlaku	22
2.2	Předehřev v aditivních technologiích	26
2.2.1	Vyhřívané komory	26
2.2.2	Předehřev základové desky	27
2.3	Tiskárna SLM 280HL	28
2.3.1	Systém pro nanášení prášku	29
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
3.1	Analýza problému	30
3.2	Cíl práce	31
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	32
4.1	Vyhřívaná komora	33
4.1.1	Schéma vyhřívané komory	33
4.1.2	Systém nanášení prášku	33
4.2	Přetlaková a temperovaná komora	34
4.2.1	Schéma přetlakové a temperované komory	34
4.2.2	Konstrukce přetlakové a temperované komory	35
4.2.3	Systém pro nanášení prášku	36
4.3	Zhodnocení koncepčních řešení	37
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	38
5.1	Konstrukce vyhřívané komory	40
5.1.1	Schéma experimentální komory	40
5.1.2	Hlavní části a montáž experimentální komory	41
5.2	Použité konstrukční materiály	43
5.2.1	Ocelový materiál	43
5.2.2	Izolační materiál	44
5.2.3	Těsnicí materiál	45
5.3	Systém ohřevu	46
5.3.1	Výběr topných těles	46
5.3.2	Geometrie topných těles	47
5.3.3	Návrh výkonu topných patron	51
5.3.4	MKP analýza ohřevu	53
5.3.5	Řízení ohřevu	59
5.4	Systém nanášení prášku	60
5.5	Výroba experimentální komory	63
5.6	Testování experimentální komory	65
5.6.1	Test ohřevu pístu	65
5.6.2	Test ohřevu experimentální komory v tiskárně SLM 280HL	68
6	DISKUZE	70
7	ZÁVĚR	72
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	73
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	76
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78

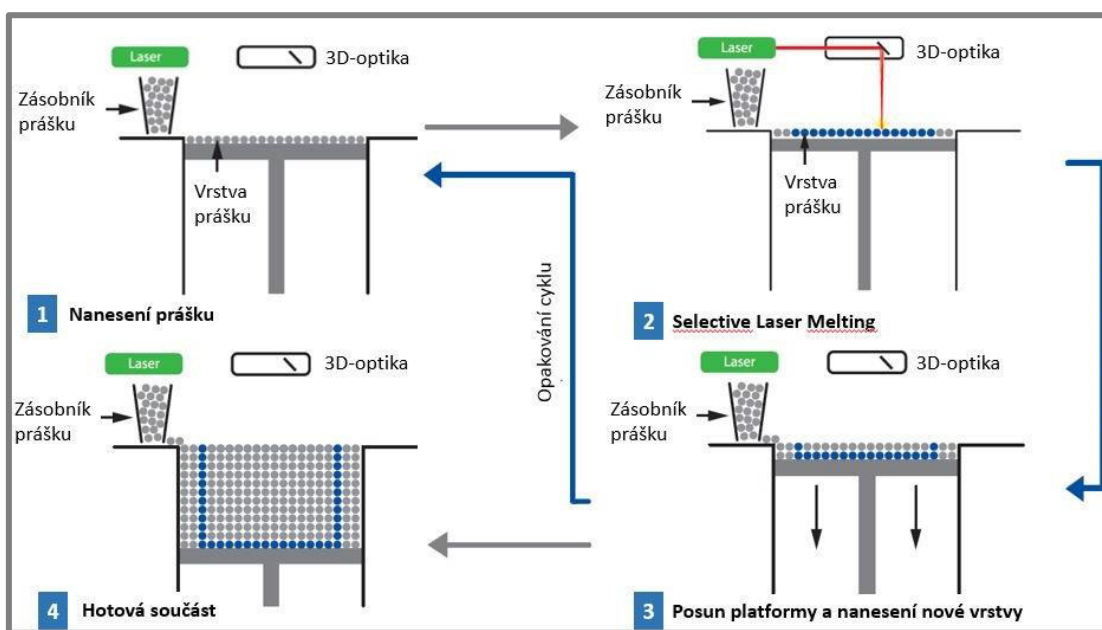
10.1	Seznam obrázků	78
10.2	Seznam grafů	79
11	SEZNAM TABULEK	80
12	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

1

Technologie Selective laser melting (SLM) umožňuje výrobu komponent s komplexní geometrií a mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s konvenčně vyráběnými součástmi. Tato technologie dovoluje zpracovávat velké množství materiálů např. ocel, hliník, titan, slitiny na bázi niklu, aj. SLM díky velké variabilitě zpracovávaných materiálů a výrobě komplexních tvarů lze využít v mnoha odvětvích, například při výrobě zubních a kloubních náhrad v lékařství, leteckém a kosmickém průmyslu. [1, 2]

Vstupními daty pro tento způsob výroby je CAD model vyráběného dílu. Model musí být softwarově rozložen na jednotlivé vrstvy a poslán do výrobního stroje. Data posílaná do stroje si sebou nesou informaci o procesních parametrech a geometrii drah pro laser. Ve výrobním stroji je pomocí nanášedce jemného prášku nanášena vrstva prášku s tloušťkou obvykle 50 μm . V dalším kroku je laserovým paprskem vypálen do prášku průřez součásti v individuální vrstvě. Po dokončení celého průřezu se platforma posune o tloušťku vrstvy směrem dolů. Nyní je na platformu nanášena nová vrstva prášku. Celý proces je cyklicky opakován, dokud není vyrobena celá součást. Výroba probíhá v inertní atmosféře. Grafické znázornění výroby technologií SLM obr. 1. [1, 2]



Obr. 1 Selective laser melting postup [3]

Kvalita vyráběných dílů technologií SLM závisí na vhodně zvolených výrobních parametrech pro daný materiál prášku. Procesní parametry lze rozdělit do kategorií na parametry laseru, skenování, prášku použité teploty a procesního tlaku. Skenovací a laserové parametry je možné v daném rozsahu pro daný typ stroje měnit téměř libovolně, ale parametry jako je přehřev, nebo změna tlaku při výrobě u většiny strojů nelze nastavovat vůbec, nebo pouze v omezeném rozsahu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

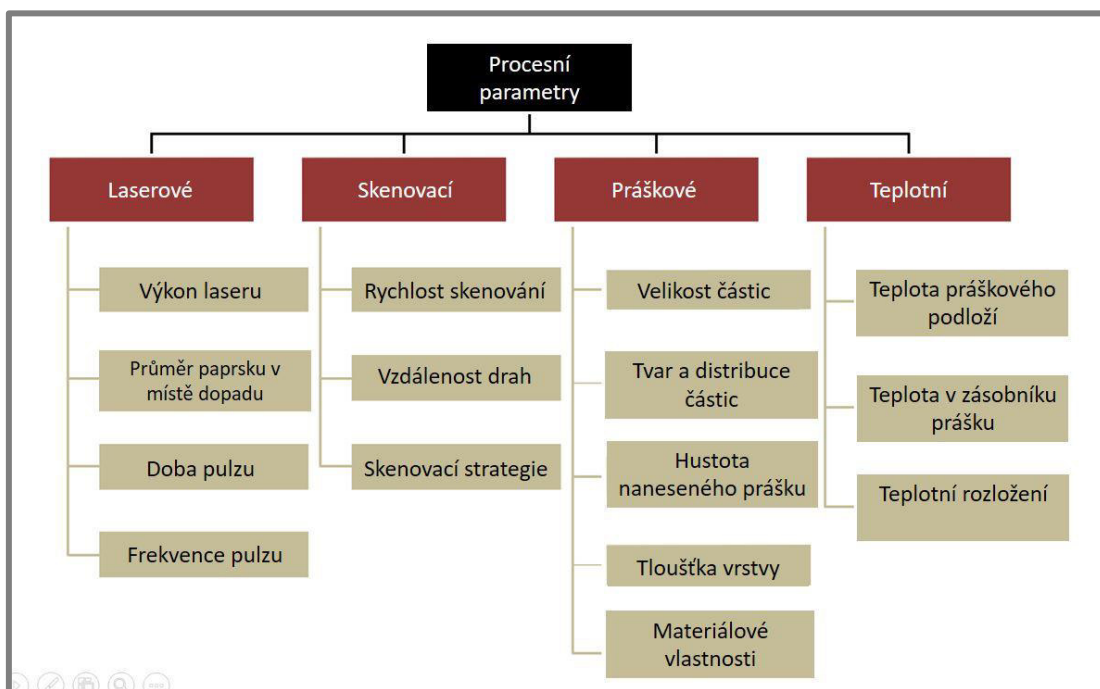
2

2.1 Vliv výrobních parametrů na zpracování materiálů technologií SLM

2.1

Výroba technologií SLM je řízena procesními parametry, které se dělí do kategorií na parametry ovlivnitelné laserem, skenováním, práškem a teplotou (obr. 2). Hlavními parametry ovlivňující kvalitu vyrobených dílů jsou rychlost skenování, vzdálenost jednotlivých drah laseru, výkon laseru a tloušťka jednotlivých vrstev [4].

Nezanedbatelný vliv na stavbu má také tlak během procesu. Tato kapitola je zaměřena především na vliv tlaku a teploty předehřevu během procesu výroby.



Obr. 2 Přehled procesních parametrů v technologii SLM [4]

2.1.1 Vliv předehřevu

2.1.1

Velkým problémem při výrobě komponent technologií SLM je vznik zbytkových napětí uvnitř materiálu. Jsou to taková napětí, která zůstanou v materiálu i po dosažení teplotní rovnováhy s okolním prostředím. Existují dva mechanismy vzniku zbytkových napětí. První je nazýván teplotně gradientní mechanismus [5].

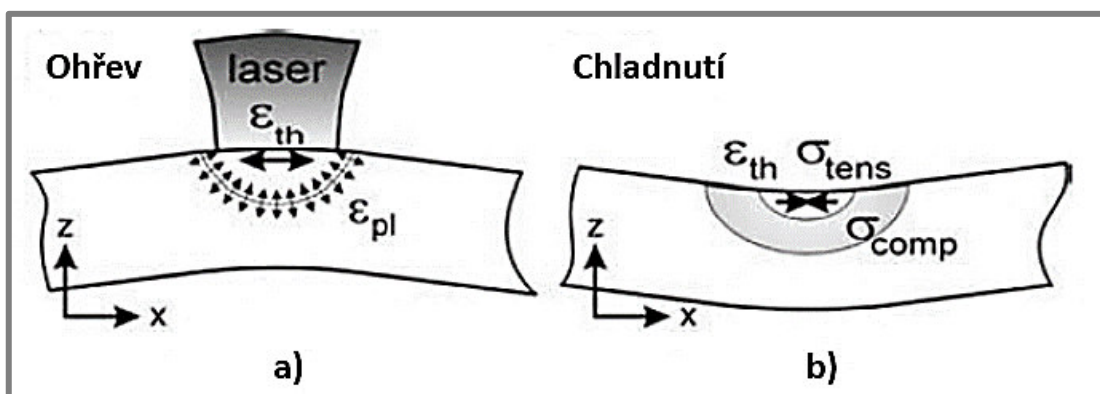
Druhý typ zbytkových napětí vzniká kvůli chladnutí fází v materiálu.

Zbytková napětí ve vyráběných dílech jsou zpravidla nežádoucí. Výjimku tvoří např. skleněné desky, kde jejich výskyt zlepšuje mechanické vlastnosti. Nicméně u většiny dílů vedou ke vzniku deformací, snížení pevnosti a vzniku trhlin v materiálu [5].

První mechanismus vzniku residuálních napětí je výsledkem velkého teplotního gradientu v bodě dopadu laseru (obr. 3a). Rychlý ohřev vrchní vrstvy materiálu paprskem laseru a následný pomalejší odvod tepla z tohoto místa způsobený nízkou tepelnou vodivostí vytvoří strmý teplotní gradient. Materiál v zahřátém místě

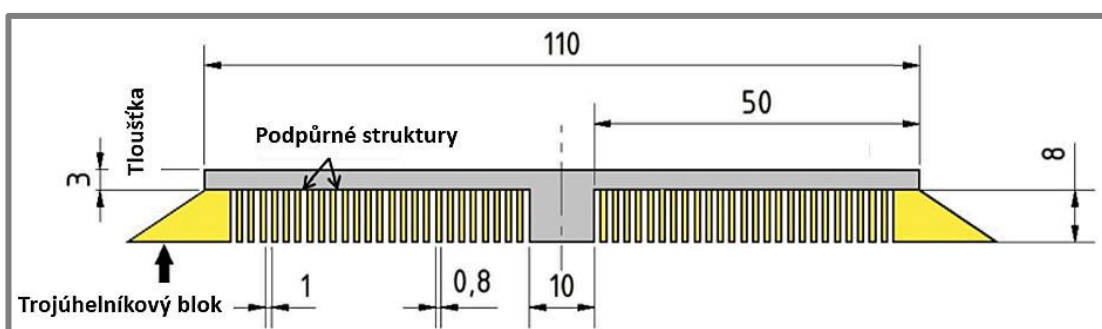
má snahu o zvětšení svého objemu, ale okolní chladnější materiál ve spodních vrstvách mu v tom brání. Tím v místě dopadu laseru vznikají elastické tlakové deformace a napětí, která mohou dosáhnout až meze kluzu. Po dosažení meze kluzu je vrchní vrstva deformována plasticky. Při chladnutí plasticky stlačené vrchní vrstvy se začíná smršťovat a součást má tendenci se deformovat dle obr. 3b. Tento způsob je využíván při ohýbání plechů, kde jsou velké deformace žádoucí na rozdíl od technologie SLM.

Druhý mechanismus vzniku zbytkových napětí je vyvolán chladnutím fázi v roztavené vrchní vrstvě součásti [5]. Chladnoucí fáze mají později tendenci se teplotně smršťovat. Této deformaci brání spodní vrstvy v součásti. Tím je vyvoláno tahové napětí ve vrchní vrstvě a tlakové napětí ve spodních vrstvách součásti.



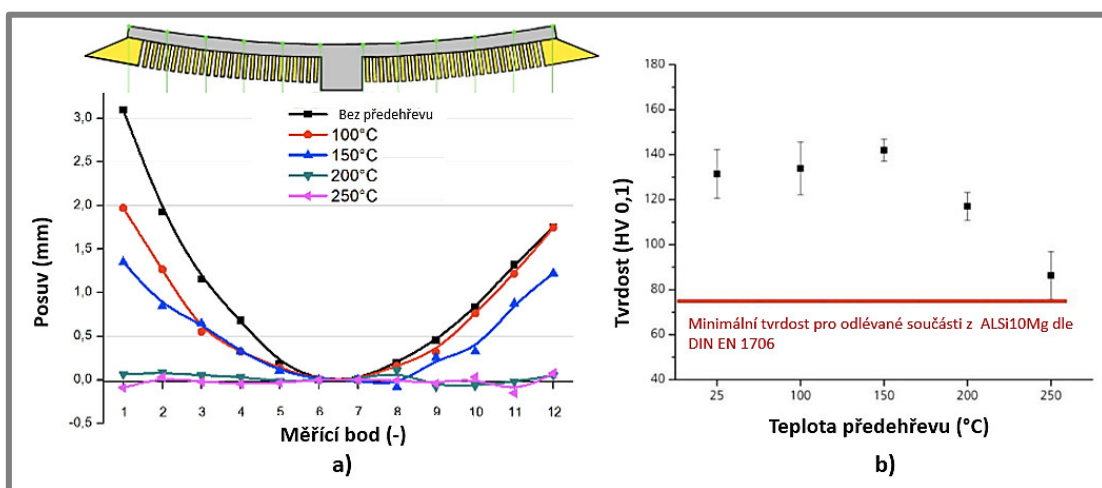
Obr. 3 Vznik zbytkových napětí [5]

Vlivu předehřevu základové desky na vznik zbytkových napětí a deformací ve slitině AlSi10Mg zpracovávané technologií SLM se věnoval **D. Buchbinder** [6]. Autor článku tiskl vzorky (obr. 4) s různou tloušťkou (0,5 až 5) mm nejdříve bez předehřevu a následně s teplotou předehřevu základové desky (100 až 250) °C vždy po 50 °C. Pokus probíhal tak, že vzorky byly tisknuty s podporami na základové desce, které se následně odřízly, a byla měřena míra posuvů konců vzorků od základové desky. K odklonu vzorku od základové desky pro tloušťku stěny 2 mm nedošlo při teplotě vyšší než 200 °C obr. 5a. Autor článku dále zkoumal vliv předehřevu na tvrdost tohoto materiálu. Tvrdost byla měřena metodou Vickers HV 0,1. Výsledná hodnota tvrdosti je průměr z deseti měření po celém povrchu testovaného vzorku obr. 5b. Při teplotě nad 150 °C se snižuje tvrdost materiálu, kde při teplotě 250 °C je pouze 90 HV 0,1, ale i tak, je pořád vyšší, než je minimální tvrdost předepsaná normou DIN EN 1706 pro odlévané součásti pro materiál AlSi10Mg.



Obr. 4 Rozměry testovaných vzorků [6]

Z výsledků pro slitinu AlSi10Mg vyplývá, že předehřev základové desky má výrazný vliv na vznik vnitřních napětí a deformací. Za daných podmínek se ukázala jako optimální teplota předehřevu pro tuto slitinu 250 °C, kdy byly deformace a vnitřní pnutí ve vzorku nejmenší. Ovšem při teplotě vyšší než 150 °C se značně snižuje tvrdost tohoto materiálu.



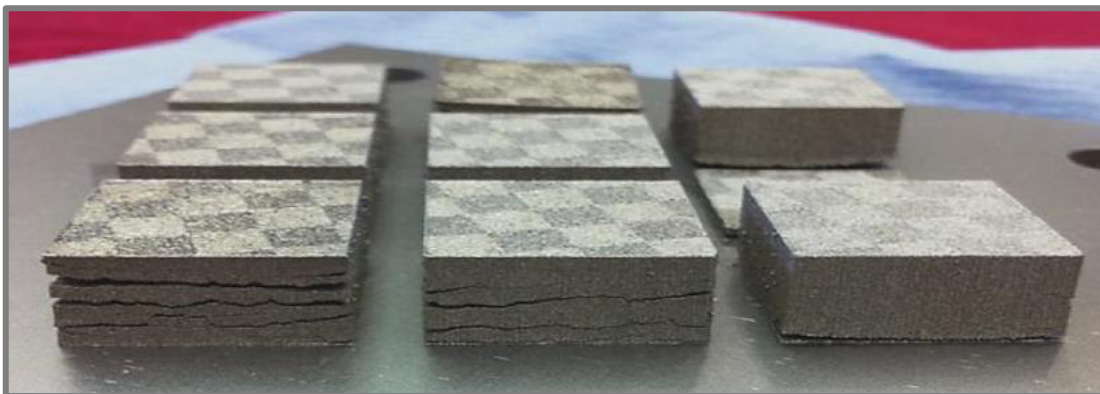
Obr. 5 a) Vliv teploty předehřevu na odklon vzorku s tloušťkou 2 mm od základové desky, b) Vliv teploty předehřevu na tvrdost vzorku [6]

Výzkumu vlivu skenovací rychlosti a předehřevu základové desky na vlastnosti vzorků z nástrojové rychlořezné oceli M2 se zabývala **K. Kempen** [7]. M2 rychlořezná ocel se vyznačuje vysokou tvrdostí i za zvýšené teploty, vysokou otěruvzdorností, relativně vysokou houževnatostí a nízkou tepelnou vodivostí. Její hmotnostní složení prvků je v tab. 1.

Tab. 1 Hmotnostní složení prvků v prášku rychlořezné oceli M2 [7]

	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V
Hmotnostní složení wt (%)	81,54	0,9	0,38	0,35	3,97	4,89	6,15	1,82

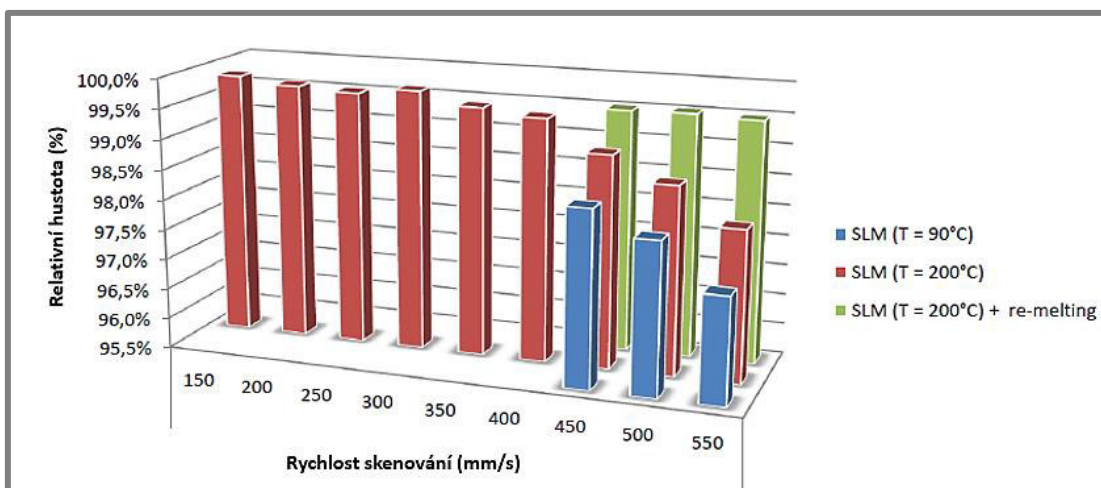
K. Kempen [7] nejprve demonstrovala, jak velký význam má vyhřívání základové desky v technologii SLM tiskem vzorků z této oceli bez předehřevu (obr. 6). Na obrázku je vidět, že vzorky tištěné bez předehřevu obsahují mnoho prasklin z důvodu vzniku velkých zbytkových napětí.



Obr. 6 Vzorky z M2 HSS oceli tisknuté bez předehřevu základové desky [7]

V samotném experimentu byly tištěny kvádrové vzorky o rozměrech (20 x 20 x 10) mm s výškou vrstvy prášku 30 μm , skenovací rychlostí (250 až 550) $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, laserem o výkonu 100 W, průměrem paprsku 180 μm , ostrovní skenovací strategií a teplotou předehřevu (90, 150 a 200) $^{\circ}\text{C}$.

Při snaze o zvýšení hustoty vzorků byl na některé použit tzv. re-melting se skenovací rychlostí 200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Při této technologii je skenována každá vrstva dvakrát. Bylo zjištěno, že relativní hustota klesá se zvyšující se skenovací rychlostí, čemuž se dá díky použití re-meltingu zabránit (obr. 7). Dále bylo dokázáno, že předehřev základové desky výrazně ovlivňuje hustotu vzorků. Vysvětlení je následující. Při aplikaci vyšší předehřívací teploty je potřeba nižší dodávka tepla od laseru na natavení prášku. To umožňuje pro vysoké předehřívací teploty použít vyšší skenovací rychlosti pro produkci součástí se stejnou hustotou.



Obr. 7 Vliv rychlosti skenování, předehřevu a re-meltingu na relativní hustotu dílů z M2 HSS oceli [7]

K. Kempen [7] se dále zabývala vlivem re-meltingu na vzorky, kdy došla k závěru, že při použití této metody dochází k iniciaci vyšších reziduálních napětí. Vysvětlení je následovné, při užití re-meltingu jsou tištěny vzorky s nižší porozitou. Bylo zjištěno, že póry snižují zbytková napětí, proto díly s nižší porozitou vykazují vyšší hodnoty zbytkových napětí. Dále užití re-meltingu na každou vrstvu vede k zvýšení ochlazovací rychlosti. Protože neroztavený prášek má nižší tepelnou vodivost než pevný materiál. To u součásti z M2 HSS oceli vyvolá vyšší výskyt martenzitu, což je křehčí fáze než fáze feritu. Porovnání dvou vzorků tištěných za stejných podmínek bez předehřevu je na obr. 8. Vzorek vlevo je tištěn bez technologie re-melting a vzorek vpravo s použitím této technologie.

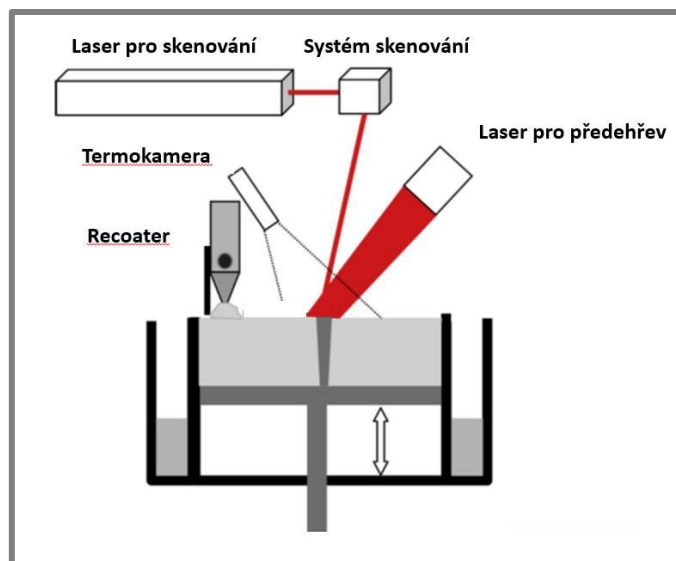


Obr. 8 M2 HSS ocelové vzorky tištěné, vlevo bez technologie re-melting, vpravo s technologií re-melting [7]

Další materiály, které je možné zpracovávat technologií SLM jsou keramické prášky. Jejich zpracování touto technologií není tak běžné, protože mají vysoký bod tání, vysokou pevnost za zvýšené teploty a nízkou teplotní vodivost. Tyto vlastnosti mají vliv na mikrostrukturu a hustotu vzorků a vedou ke vzniku trhlin během zpracování technologií SLM. Nejlepším způsobem pro omezení vzniku trhlin je vysoký předehřev prášku. [8]

Autor **Qi Liu** [8] hledal optimální výrobní podmínky jako je rychlost skenování, výkon laseru a teplota předehřevu tak, aby dosáhl co nejlepších výsledů hustoty keramických vzorků. Zpracovávan byl keramický prášek oxidu zirkoničitého stabilizovaného oxidem yttritým ($\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ 93–7).

Teplota předehřevu byla zajištěna pomocí přídavného laseru, viz obr. 9. Hlavní parametry SLM procesu při zpracování tohoto keramického prášku jsou uvedeny v tab. 2. [8]



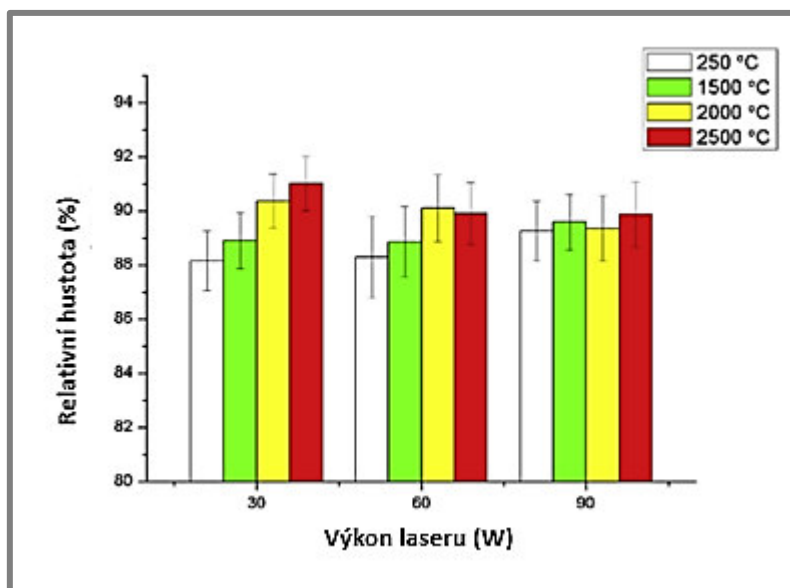
Obr. 9 Schéma předehřevu s použitím druhého laseru [8]

Tab. 2 Výrobní parametry při zpracování ZrO₂-Y₂O₃ prášku metodou SLM [8]

Parametr	
Skenovací laser	IPG YLR vláknový laser
Výkon laseru (W)	30, 60, 90
Laser pro předehřev	Nd-YAG laser
Výkon předehřívacího laseru (W)	277, 406, 510
Teplota předehřevu (°C)	1500, 2000, 2500
Skenovací rychlost (m·s ⁻¹)	0,02-5
Tloušťka vrstvy (μm)	150
Prostředí	Atmosféra

Při testu byly vyráběny vzorky o rozměrech (5 x 5 x 5) mm. Při zkoumání vlivu předehřevu a skenovací rychlosti na výslednou relativní hustotu vzorků bylo zjištěno, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při předehřevu na teplotu 2500 °C a výkonu laseru 30 W. Za těchto podmínek bylo dosaženo 91% relativní hustoty, viz obr. 10.

Během testů bylo dokázáno, že je možné vyrábět díly z oxidu zirkoničitého stabilizovaného oxidem yttritým aditivním způsobem výroby technologií SLM. Pod podmínkou vysokého předehřevu, alespoň na teplotu 2000 °C. Jedině tak lze vyrábět díly s relativně vysokou hustotou a nízkým počtem trhlin [8].



Obr. 10 Vliv výkonu laseru a teploty předehřevu na relativní hustotu vzorků z $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ [8]

Předehřev je možné použít i v technologii Electron Beam Melting (EBM). Vliv teploty předehřevu na výrobu vzorků z titanové slitiny Ti6Al4V zkoumal **H. Weiwei** [9]. Předehřev na teplotu 600 °C byl zajištěn elektronovým dělem, které vždy před začátkem skenování nové vrstvy ohřálo povrch na danou teplotu. Po ohřátí povrchu byl zvýšen výkon elektronového děla a snížena skenovací rychlost. Následně byl vypálen průřez součásti v dané vrstvě. Výroba probíhala za tlaku (10^{-2} až 10^{-4}) Pa s tloušťkou vrstvy 0,1 mm.

Bylo zjištěno, že předehřev na správnou teplotu vede k částečnému nebo úplnému natavení malých zrn prášku. Tyto roztavené částičky působí jako pojivo pro velká zrna a drží je u sebe při procesu spékání. Dále zlepšují smáčecí podmínky mezi roztaveným kovem a částicemi prášku a tím zabraňují tvorbě kapiček na povrchu součástí, čímž dojde k zvýšení kvality povrchu.

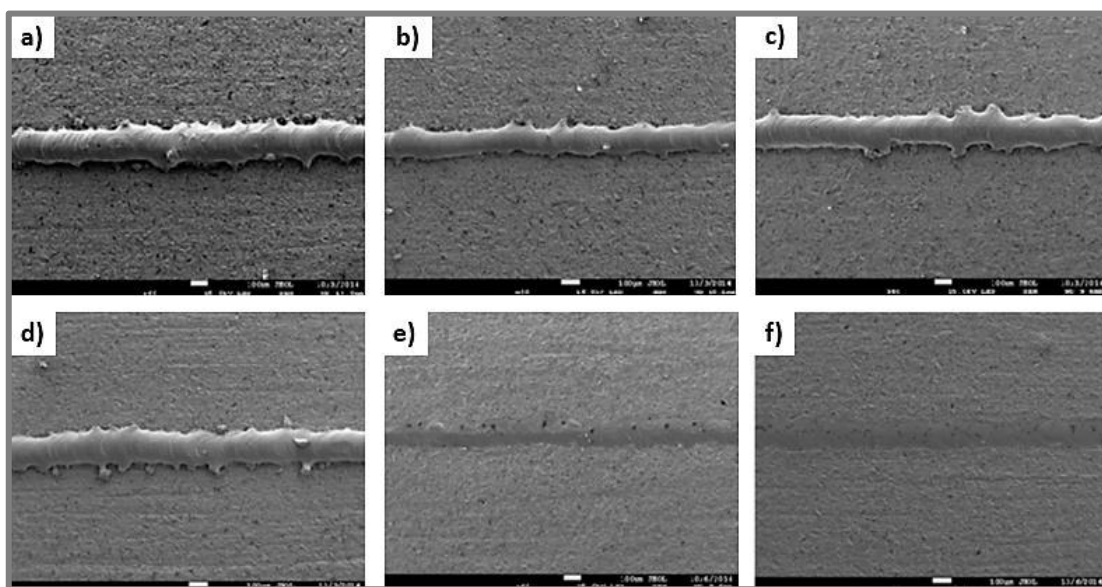
Xiao Meili [10] si nechal patentovat způsob výroby technologií SLM a teplotní zpracování titanové slitiny s označením TC4. Kdy za daných podmínek procesu SLM a přesného teplotního zpracování dokázal zvýšit pevnost této titanové slitiny na více než 1000 MPa s tažností ne menší než 10 %.

Slitina byla zpracována výkonem laseru (300 až 325) W, průměrem paprsku (0,12 až 0,14) mm, skenovací rychlostí (500 až 1200) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tloušťkou vrstvy (0,03 až 0,04) mm. Následně součásti byly žíhány. Nejprve ve vakuu s teplotou (780 až 820) °C s výdrží 1,52 h a chlazením na vzduchu. V druhé fázi žíhání byla součást opět vložena do vakuové komory vyhřáté na teplotu (530 až 550) °C na dobu dvou až tří hodin. Ochlazení bylo provedeno opět na vzduchu. Takto zpracované součásti s vysokou pevností a relativně vysokou tažností nachází uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu.

2.1.2 Vliv tlaku

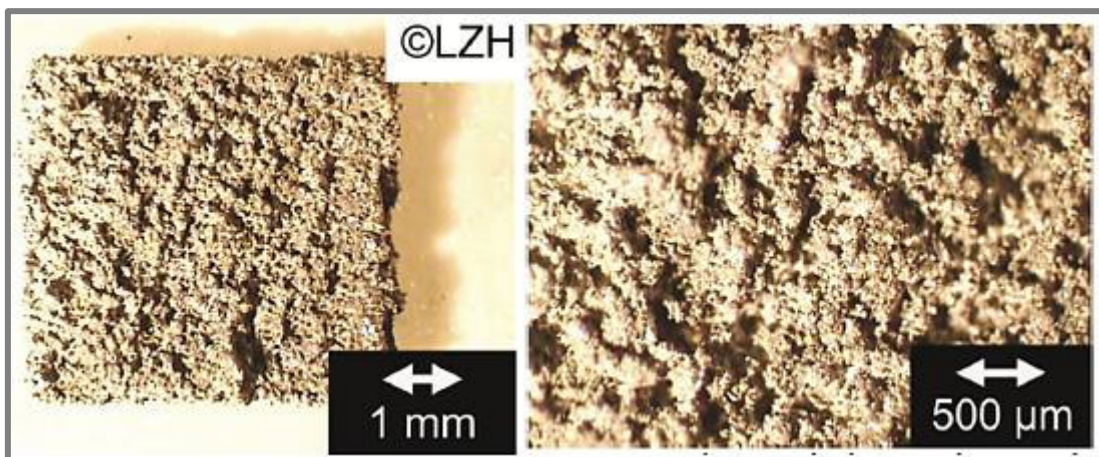
A. Masmoudi [11] při snaze o simulaci interakce mezi laserem, práškem a tlakem ochranné atmosféry dokázal několik významných faktorů, které změna tlaku v procesní komoře ovlivňuje. Dokázal, že se snižujícím se tlakem v komoře klesá rozdíl mezi bodem tání a bodem varu nerezavějící oceli 316L. Pokus probíhal při tvorbě liniových vzorků za konstantní rychlosti skenování $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonem laseru 100 W. Kdy v argonové atmosféře při tlaku do 10 kPa docházelo k tvorbě homogenních pevných liniových vzorků (obr. 11a-d). Při nižším tlaku pevná část tracku zmizela a zbyla po ní pouze stopa v oblasti přímo pod místem pálení laseru (obr. 11e). To bylo způsobeno již zmíněným sníženým rozdílem mezi bodem tání a bodem varu. Ihned po natavení prášku došlo k jeho rychlému odpaření. Proto při tomto tlaku nedošlo ke vzniku žádné pevné stopy. Po dalším snížení tlaku na 0,1 kPa nedošlo k natavení prášku, ale nastala ihned sublimace pevného prášku (obr. 11f).

To vede k závěru, že se snižujícím se tlakem v pracovní komoře dochází nejen ke snižování rozdílu mezi bodem tání a varu, ale také k zvýšenému množství spalín, které mohou ovlivňovat intenzitu laseru v oblasti spékání.



Obr. 11 Vliv tlaku na single tracky nerezavějící oceli 316L a) 995 mbar b) 500 mbar c) 250 mbar d) 100 mbar e) 10 mbar f) 1 mbar [11]

Vliv procesních parametrů na výrobu součástí z magnesia a jeho slitin sledoval **Gieseke** [12]. Při prvním pokusu byly tisknuty jednovrstvé čtvercové vzorky z čistého magnesia (obr. 12) v argonové a heliové ochranné atmosféře s přetlakem až 30 kPa. Byl sledován vliv přetlaku, výkonu laseru a skenovací rychlosti na procesní parametry. Výsledkem pokusu byl důkaz, že je možné vyrábět součásti z čistého magnesia



Obr. 12 Magnesiové singl track čtvercové vzorky [12]

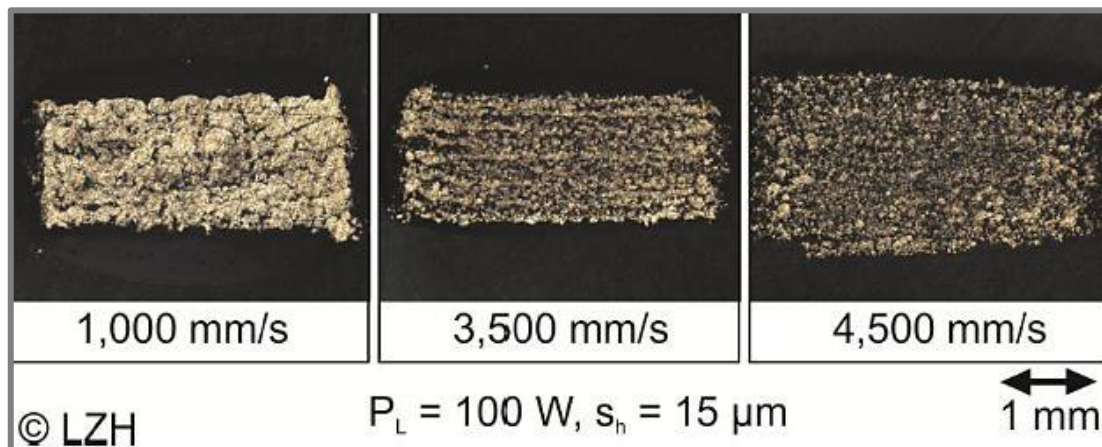
technologií SLM. Problémem však může být vysoká hrubost vzorků. Dalším zjištěním bylo, že přetlak 30 kPa má příznivý vliv na výrobu. Ukázalo se také, že použití argonové ochranné atmosféry není vhodné z důvodu srážení procesních emisí na ochranném skle.

Další pokusy tedy byly zaměřeny na výzkum vlivu přetlaku a dalších výrobních parametrů na zpracování čistého magnesia a jeho slitin $\text{MgCa}_{0,8}$, WE43, WZ21, $\text{Mg}_{60}\text{Zn}_{35}\text{Ca}_5$. Pokusy byly prováděné v modifikované komerční 3D tiskárně SLM 125HL. Kdy standardní procesní komora byla vložena do přetlakové komory schopné vyvodit přetlak až 200 kPa (obr. 13Obr. 13).



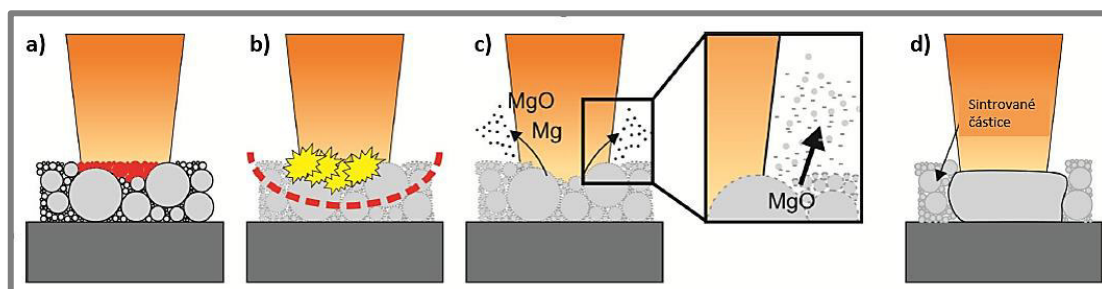
Obr. 13 Modifikovaná tiskárna SLM 125HL [12]

Výsledek testu s rychlostí skenování (1 až 4,5) mm·s⁻¹, výkonem laseru 100 W a přetlakem 200 kPa byl následovný (obr. 14). Bylo zjištěno, že se jedná o velice nestabilní proces, kdy náhodně docházelo k odtrhávání vzorků od podkladu a základové desky. Nikdy nebylo dosaženo vyšší hustoty než 99 %. [12]



Obr. 14 Magnesiové vzorky tištěné v přetlakové komoře [12]

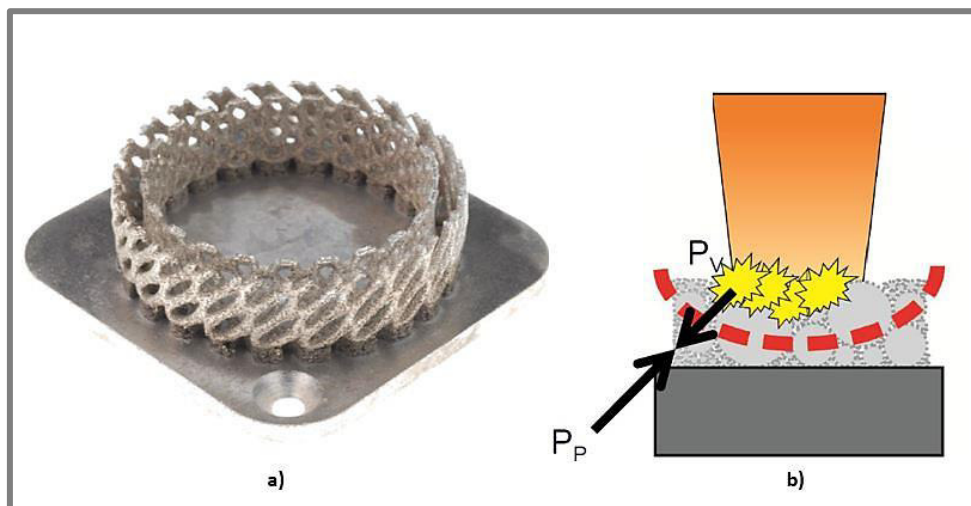
Při stavbě vzorků se ukázalo jako velký problém vypařování těchto lehkých slitin během spékání laserem. Tyto emise rozptylují laserový paprsek, což vede k ovlivnění tisknutých dílů a nestabilitě procesu. Jejich vznik byl závislý na slitině a tlaku v komoře. Vypařování ovlivňuje i chemické složení magnesiových slitin. Další jev spojený se stavbou magnesiových slitin je velmi rychlá tvorba oxidů. Oxidy na povrchu částic prášku se tvoří v čase kolem 30 ns. Jedná se o tenkou kujnou vrstvu (1 nm), která zhoršuje smáčivost. Tuto vrstvu je nutné během procesu rozbít paprskem laseru. [12]



Obr. 15 SLM proces při zpracovávání magnesia [12]

Postup při rozbíjení oxidické vrstvy je popsán na obr. 15. V prvním kroku dochází k nahrání horní vrstvy prášku (obr. 15a). Následně dochází k odpařování vrchní vrstvy, vytvoření nárazové vlny a rozbití oxidické vrstvy (obr. 15b). Nárazová vlna uvolní nanočástice magnesia a jeho oxidů do okolní atmosféry (obr. 15c). Tím se vytvoří neoxidovaný povrch, který následně opět oxiduje (obr. 15d).

Závěr je, že zpracování magnesia a jeho slitin technologií SLM je možné. Lze vytvořit díly s téměř 100% hustotou (obr. 16a). Nicméně je nezbytné vyvolat nárazovou vlnu, která prorazí špatně smáčivou oxidickou vrstvu. Toto vede k tvorbě výparů, které ovlivňují proces stavby. Tudíž proces stavby se stává nestabilním. Pokud je při procesu použit přetlak, dochází k oslabení síly nárazové vlny (obr. 16b) a snížení množství emisí. [12]



Obr. 16 a) Magnesiový díl zpracovaný technologií SLM b) Oslabení nárazové vlny okolním tlakem [12]

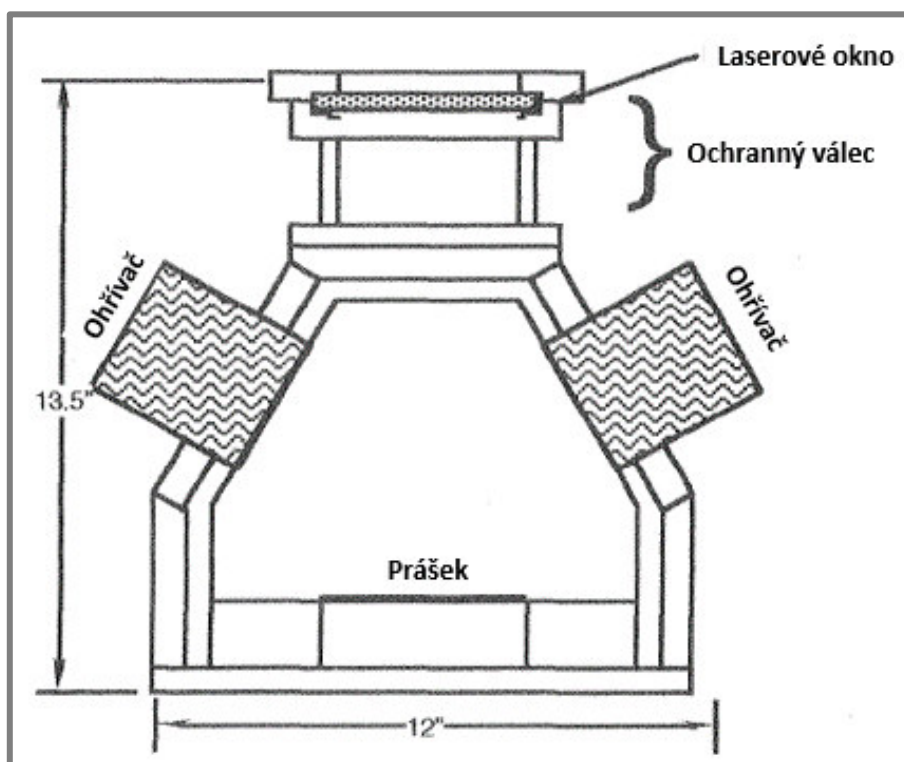
2.2 Předehřev v aditivních technologiích

Aditivní technologie výroby Electron Beam Melting (EBM) používá pro předehřev elektronové dělo, kterým předehřeje každou vrstvu před začátkem skenování. U technologie SLM, jak již bylo zmíněno výše, lze předehřev zajistit přídavným laserem. Mezi další způsoby předehřevu patří vyhřívání základové desky, popřípadě vyhřívání komory. Takovéto komory mají výhodu v poměrně velké teplotní stabilitě, protože například u použití přídavného laseru ohřev musí být přerušen vždy při nanášení nové vrstvy. Vyhřívání komora by měla umožnit i tepelně zpracovat součást ihned po skončení výroby.

2.2.1 Vyhřívání komory

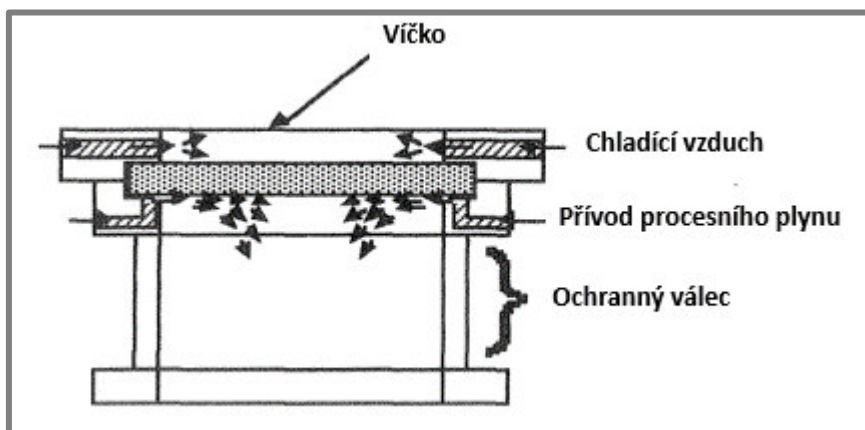
Na Texaské univerzitě v Austinu se **J. McWilliams** [13] zabýval konstrukcí vyhřívání komory pro Selective Laser Sintering (SLS). Navrhnutá komora (obr. 17) měla být schopna pracovat v rozmezí teplot (100 až 1000) °C. Na základě pokusů a faktu, že pro snadnou a rychlou regulaci teploty je vhodné použít vyhřívání s nízkou hmotností vyhřívacího systému. Jako tepelný zdroj byly zvoleny dva infračervené ohřivače s celkovým tepelným výkonem 20 kW. Jejich umístění bylo navrženo tak, aby laserový paprsek mohl projít skrze laserové okno až na spékaný prášek a také s ohledem na rovnoměrné rozložení teploty v ohřívání oblasti a efektivitu ohřevu.

Konstrukce komory musela být navržena se schopností odolat vysokým teplotám. Proto vnitřek komory byl obložen izolací z keramických vláken s ocelovým opláštěním zevnějšku.



Obr. 17 Konstrukce vyhřívání komory [13]

Hlavní funkce ochranného válce je ochránit laserové okno před vysokými teplotami. Okno je také nutné chladit a ochránit před spaliny ze spékacího procesu. To je vyřešeno přívodem inertní atmosféry těsně pod laserové okno (obr. 18), kde proudění inertní atmosféry má zamezit spalinám dostat se k oknu. Odvod procesního plynu se nachází ve spodní části komory.



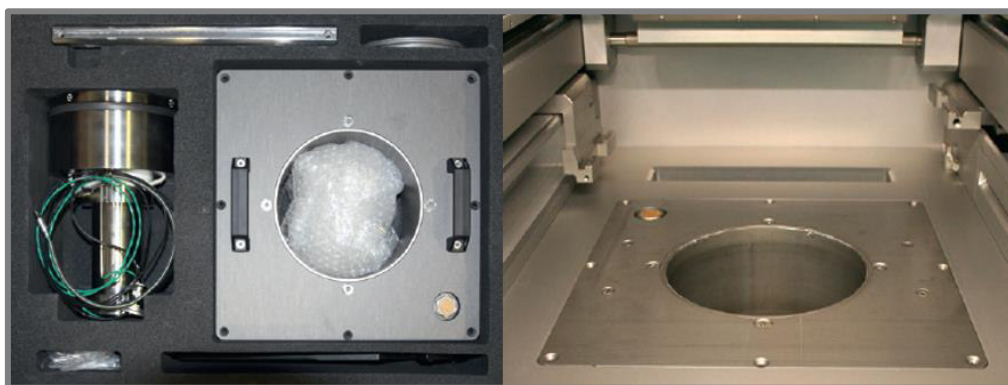
Obr. 18 Ochrana laserového okna [13]

Po zkonstruování této komory byla provedena série testů. Prvním z testů byla ověřena schopnost všech komponent odolávat vysokým teplotám. Při tomto testu se ukázalo, že ochrana laserového okna nebyla dostatečná, bylo porušeno a muselo být nahrazeno odolnějším vůči teplotám. Další testy měly za cíl určit tepelnou účinnost, kdy do místa pro prášek byla vložena nádoba s definovaným množstvím vody. Po zapnutí ohřívачů na dobu třiceti sekund byla měřena změna její teploty. Účinnost při tomto testu byla pouze 18 %.

2.2.2 Předehřev základové desky

2.3.2

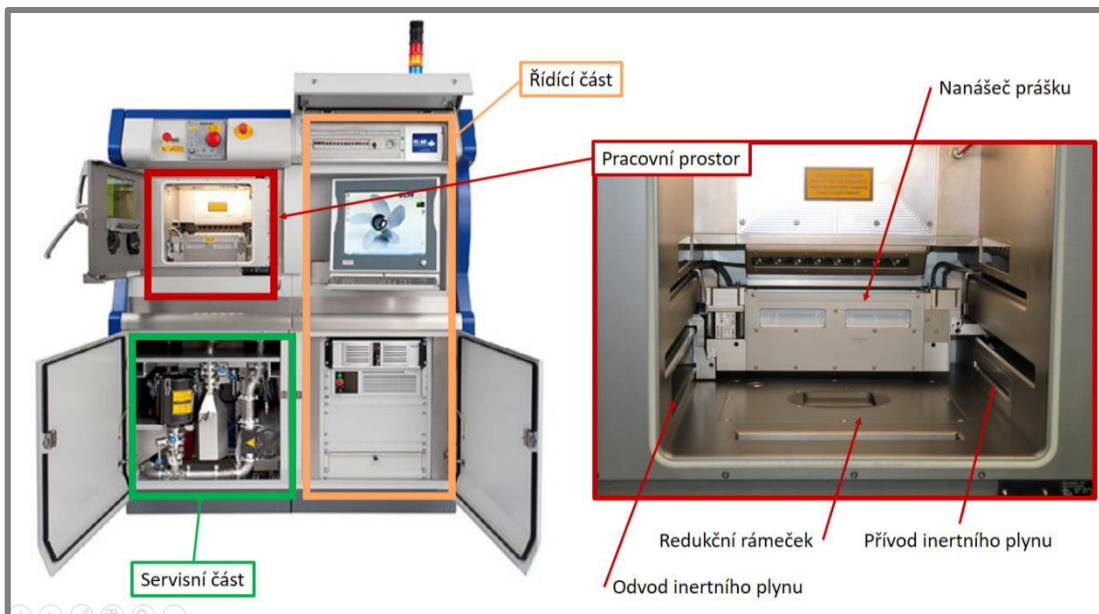
Jedním ze způsobů, jak lze zajistit předehřev, je použití vyhřívané základové desky. Podložky se obvykle skládají ze dvou částí, spodní vyhřívané a vrchní na kterou se tisknou součásti. Obvyklá teplota předehřevu instalovaná například v zařízení SLM 280HL na Ústavu konstruování je do 200 °C. Pro některé materiály tato teplota nemusí být dostatečná, proto společnost SLM Solutions nabízí modifikovanou vyhřívanou základovou desku (obr. 19), schopnou předehřevu až na teplotu 550 °C [3]. Na této podložce je možné vyrábět díly o průměru až 90 mm a výšce 100 mm.



Obr. 19 Vyhřívaná podložka od společnosti SLM Solutions [3]

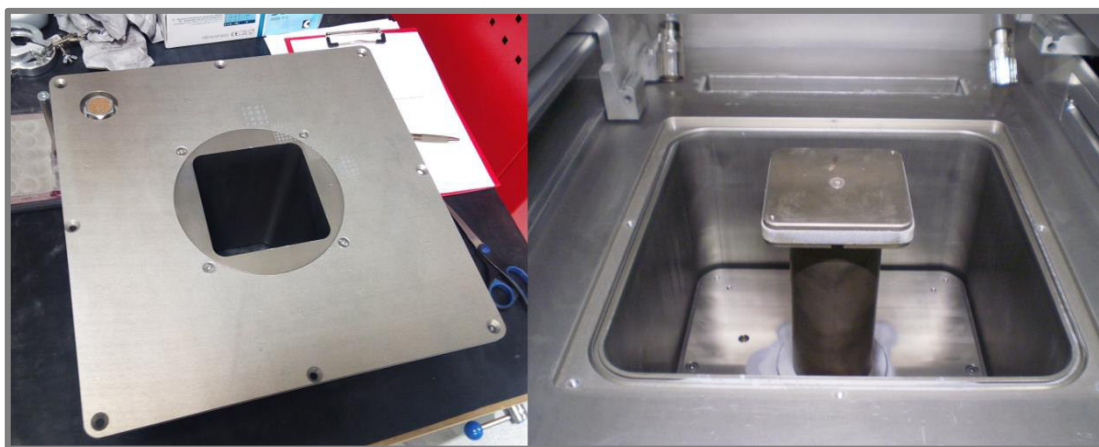
2.3 Tiskárna SLM 280HL

Tiskárna SLM 280HL na Ústavu konstruování poskytuje pracovní prostor o velikosti (280 x 280 x 325) mm a obsahuje jeden vláknový laser o výkonu 400 W (obr. 20). Teplota předehřevu stavěcí desky je omezena maximálně na 200 °C. Pracovní prostor je možné zmenšit použitím redukčního rámečku na (98 x 98) mm. Při jeho použití se teplota předehřevu šíří pouze konvekci na zmenšenou stavěcí desku. Tím dochází k tepelným ztrátám a výsledná teplota na zmenšené ploše tisku nedosáhne teploty 200 °C. Při procesu stavby se používá inertní atmosféra tvořená dusíkem, nebo argonem o přetlaku 20 kPa. V pracovním prostoru je umístěn posuvný nanášec prášku.



Obr. 20 3D tiskárna SLM 280HL [3]

Vyjmutím redukčního rámečku (obr. 21 vlevo) a pístu (obr. 21 vpravo), na kterém je umístěna zmenšená stavěcí deska vznikne prostor, který je k dispozici pro návrh experimentální komory.



Obr. 21 Vlevo: redukční rámeček; Vpravo prostor pro návrh experimentální komory

2.3.1 Systém pro nanášení prášku

Při stavbě součástí technologií SLM je součást vyráběna postupně po tenkých vrstvách např. 50 μm . Před začátkem samotného procesu tavení prášku laserem je nutné nanést novou vrstvu prášku. K tomu slouží systémy pro nanášení prášku.

Standardně používaný systém pro nanášení prášku v 3D tiskárně SLM 280HL je uzpůsobený pro teploty předehřevu základové desky do teploty 200 °C. Obsahuje silikonovou stěrku, zásobník prášku, a systém pro jeho dávkování. Na obrázku (obr. 22) je rozložený nanášec prášku z 3D tiskárny SML 280HL.

Systém pro dávkování prášku je tvořen dvěma válcovými součástmi s drážkami, které při se během nanášení otáčejí a dávkují tak prášek pod zařízení. Prášek je následně stěrkou rovnoměrně rozetřen po celé ploše tisku.



Obr. 22 Rozložený nanášec prášku

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Aditivní způsoby výroby kovových materiálů se v posledních letech rozšiřují do stále více průmyslových odvětví, nicméně jejich použití je omezené množstvím prověřených materiálů. Zvýšením portfolia zpracovatelných materiálů umožní metodu SLM zpřístupnit pro další průmyslově zpracovávané komponenty.

Jedním z problémů při zpracování kovových materiálů technologií SLM je vznik vnitřních napětí, která způsobují trhliny a deformace dílů. Jejich vznik je především způsoben vysokým teplotním gradientem mezi místem dopadu paprsku laseru a okolním materiálem. Předehřevem prášku dochází k snížení teplotního gradientu a vzniku vnitřních napětí. Součástí pak vykazují nižší počet trhlin a deformací, tvarová přesnost je naopak zvýšena. S užitím vyšších předehřívacích teplot je možné zvýšit produktivitu skenováním použitím vyšších skenovacích rychlostí, při zachování stejné porozity. Nižší výkon laseru je možné kompenzovat předehřevem prášku, kdy není potřeba tak vysoké energie pro jeho natavení. To vede k možnosti zpracovat materiály s vysokým bodem tání.

Správné nastavení teploty předehřevu má vliv např. při zpracovávání hliníkových prášků na jejich mechanické vlastnosti, konkrétně na tvrdost. Kde bylo zjištěno, že při vyšších předehřívacích teplotách dochází k snížení tvrdosti vyráběných součástí. U slitiny AlSi10Mg toto nastává již od teplot vyšších než 150 °C. U titanových prášků lze použít teplotu i 600 °C a u keramických materiálů až 2000 °C.

Tlak při procesu ovlivňuje fázové změny látek. Při snižování tlaku v procesní komoře dochází k snižování rozdílu mezi bodem tání a bodem varu materiálů. To má největší vliv při zpracování lehkých prvků např. hořčíku. Kdy dochází k vyšší tvorbě spalin, které rozptylují paprsek laseru. Tím je snížena jeho účinnost a je tak negativně ovlivněna tvarová přesnost dílů. Klíčem ke zpracování takovýchto slitin je efektivní odstraňování vznikajících spalin, popřípadě omezení jejich vzniku. Vzhledem k tomu je výhodnější použít přetlak při stavbě dílů.

3.2 Cíl práce

3.2

Cílem práce je konstrukční návrh demontovatelné experimentální komory pro zařízení SLM280HL s těmito parametry:

- samostatné vyhřívání minimálně do 400 °C,
- vestavěný systém pro nanášení vrstev,
- rozměry výrobitelného dílu minimálně (50 x 50 x 50) mm.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikace zástavbových možností a definice koncepcí řešení,
- konstrukce vyhřívané komory s nanášecím zařízením,
- analýza rozložení teplot a použitelných materiálů,
- realizace funkčního vzorku vyhřívané komory,
- ověření funkčnosti navrženého systému vyhřívání.



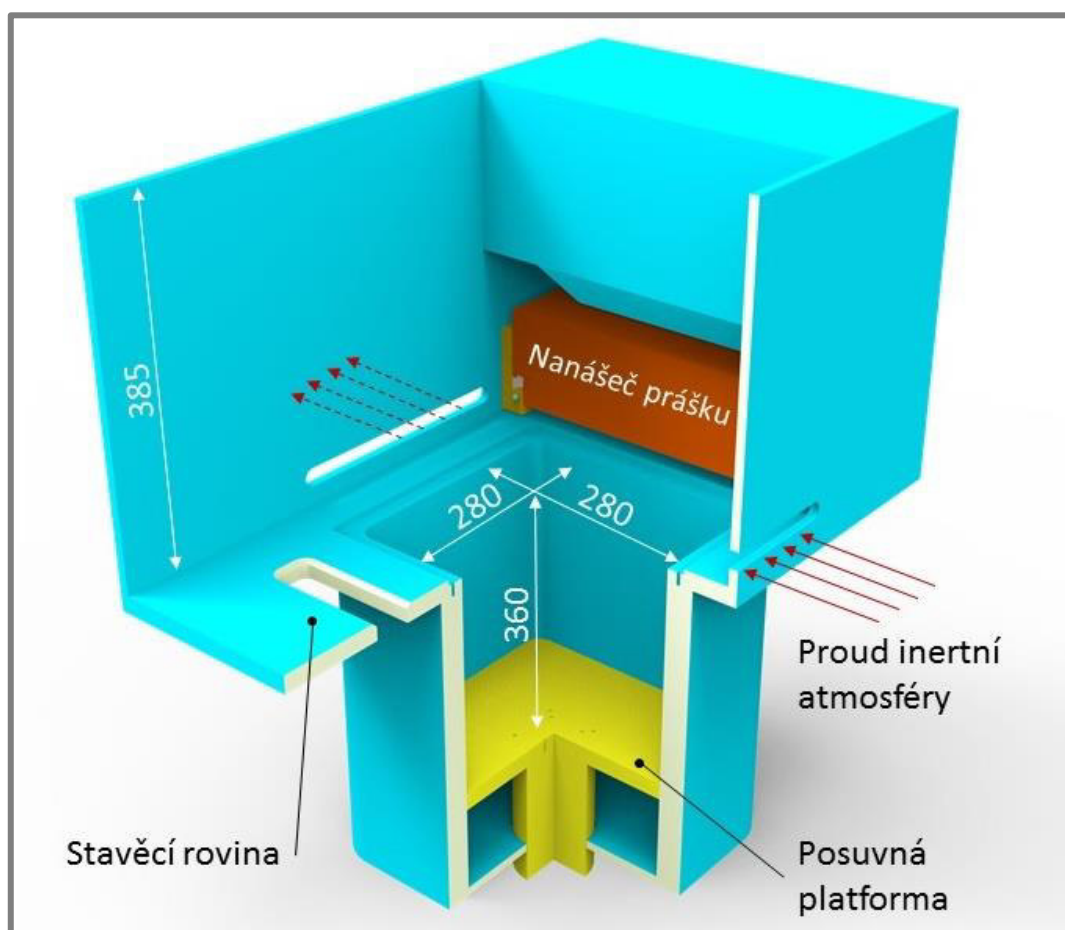
Obr. 23 Tiskárna SLM 280HL

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Všechna koncepční řešení vychází z požadavku na umístění experimentální komory do pracovního prostoru 3D tiskárny SLM 280HL (obr. 24). Z tohoto požadavku vyplývají jistá pozitiva a negativa. Mezi pozitiva patří možnost využití funkčních systému stroje, např. mechanismus pro posun platformy, laser, přívod inertní atmosféry a nanášec prášku. Negativa jsou přímo spojena s pracovním prostorem, který je limitující z hlediska maximálních rozměrů experimentální komory a její montáže.

Posun stavěcí desky o tloušťku vrstvy je zajištěn *posuvnou platformou*, kde její pohyb je při tisku automaticky řízen tiskárnou. Experimentální komora má být vložena do prostoru (280 x 280) mm. Maximální hloubka od *stavěcí roviny* je omezena minimální polohou *posuvné platformy* na 360 mm. Maximální výška je 385 mm.

Jednotlivá koncepční řešení se od sebe liší v závislosti na procesních parametrech, které experimentální komora bude kontrolovat. V návrzích se především uvažovalo s kontrolou tlaku, teploty a jejich kombinací.



Obr. 24 CAD model pracovního prostoru 3D tiskárny SLM 280

4.1 Vyhřívání komora

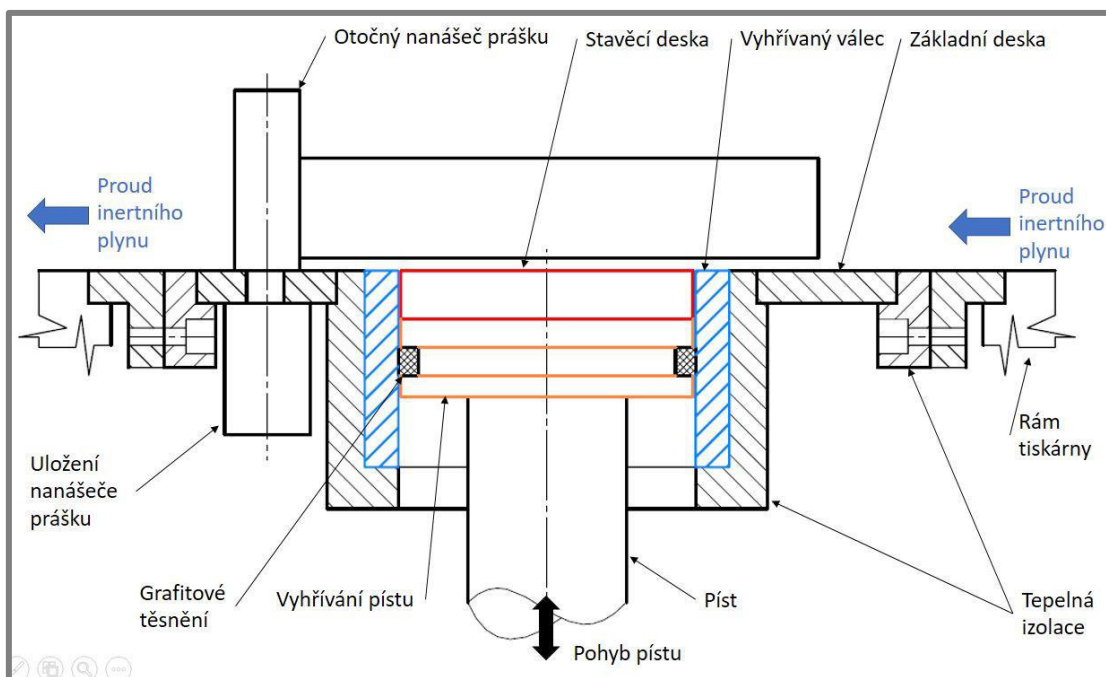
4.1

Varianta tohoto koncepčního řešení se zabývá návrhem vyhřívání experimentální komory umístěvané do prostoru 3D tiskárny (obr. 24). Maximální teplota ohřevu je navržena na 600 °C. V návrhu je počítáno s konstrukcí vlastního otočného nanášeče prášku, aby mohlo být dosaženo takto vysoké teploty přehřevu. Stávající nanášec není stavěn do vysokých teplot.

4.1.1 Schéma vyhřívání komory

4.1.1

Schéma vyhřívání experimentální komory je zobrazeno na obr. 25. Experimentální komora je usazena do prostoru tiskárny tak, že *základní deska* je v rovině se *stavěcí rovinou* viz obr. 24. Tisk probíhá na vyhřívání *stavěcí desku* o průměru 75 mm. Vyhřívání je zajištěno přestupem tepla z *vyhřívání pístu* umístěného pod touto deskou. K pohybu *pístu* slouží přesný posuvný mechanismus tiskárny. Pro zajištění homogenní teploty ohřívání prášku je vyhříván i *vyhřívání válec*. Mezi *vyhříváním válcem* a *vyhříváním pístu* je umístěno těsnění pro zabránění propadávání prášku mezi těmito díly. Otočný systém pro nanášení vrstev prášku je ustaven v *základní desce*. Pro zabránění šíření teploty do rámu tiskárny je mezi *vyhříváním válcem* a *základní deskou* vložena *tepelná izolace*, stejně tak, jako mezi *základní deskou* a *rámem tiskárny*.



Obr. 25 Schéma vyhřívání komory

4.1.2 Systém nanášení prášku

4.1.2

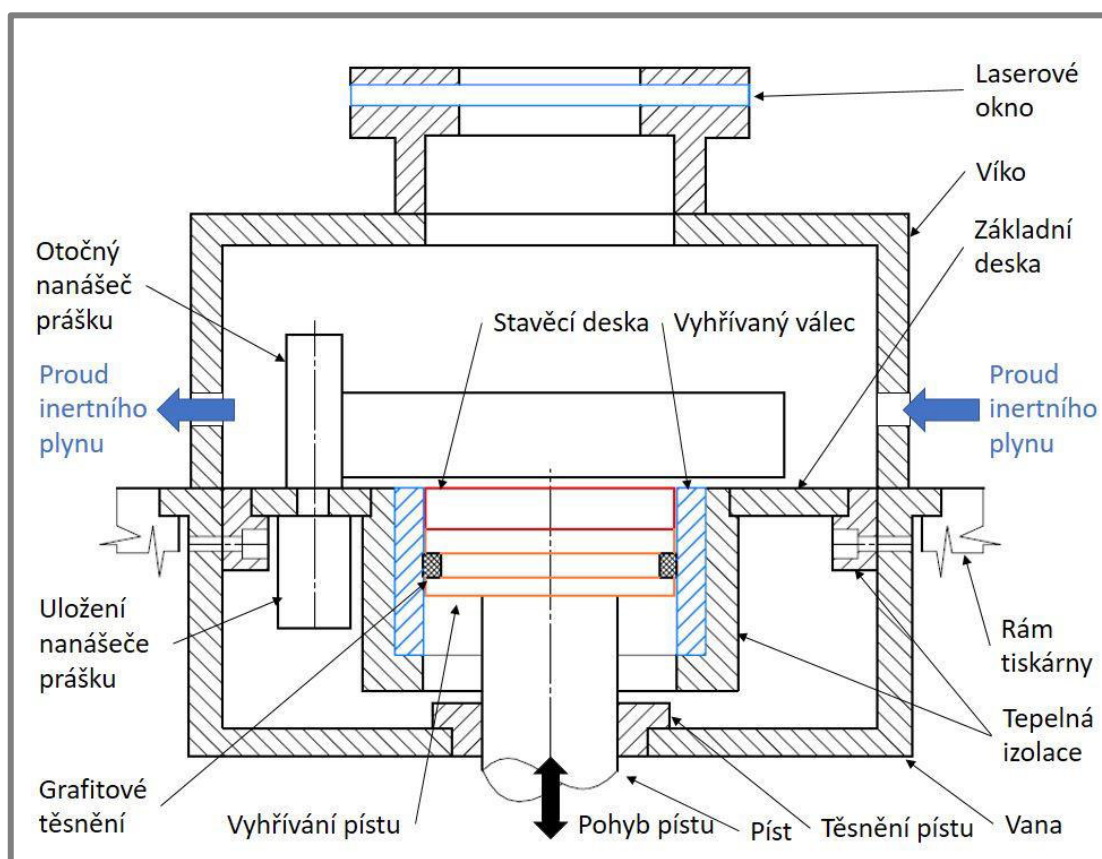
Pro nanášení prášku byl pro tuto variantu navržen jednoduchý otočný nanášec prášku, umístěný na *základní desce*. Dávkování probíhá mechanicky přes doraz v základní poloze. Zásobník prášku je umístěn přímo v nanášeci.

4.2 Přetlaková a temperovaná komora

Varianta přetlakové a temperované komory je z velké části inspirována první variantou, ke které bylo přidáno opláštění pro těsnění tlaku. Komora byla navržena pro těsnění přetlaku až 0,2 MPa. Ohřev je stejně jako v první variantě navržen na maximální teplotu 600 °C.

4.2.1 Schéma přetlakové a temperované komory

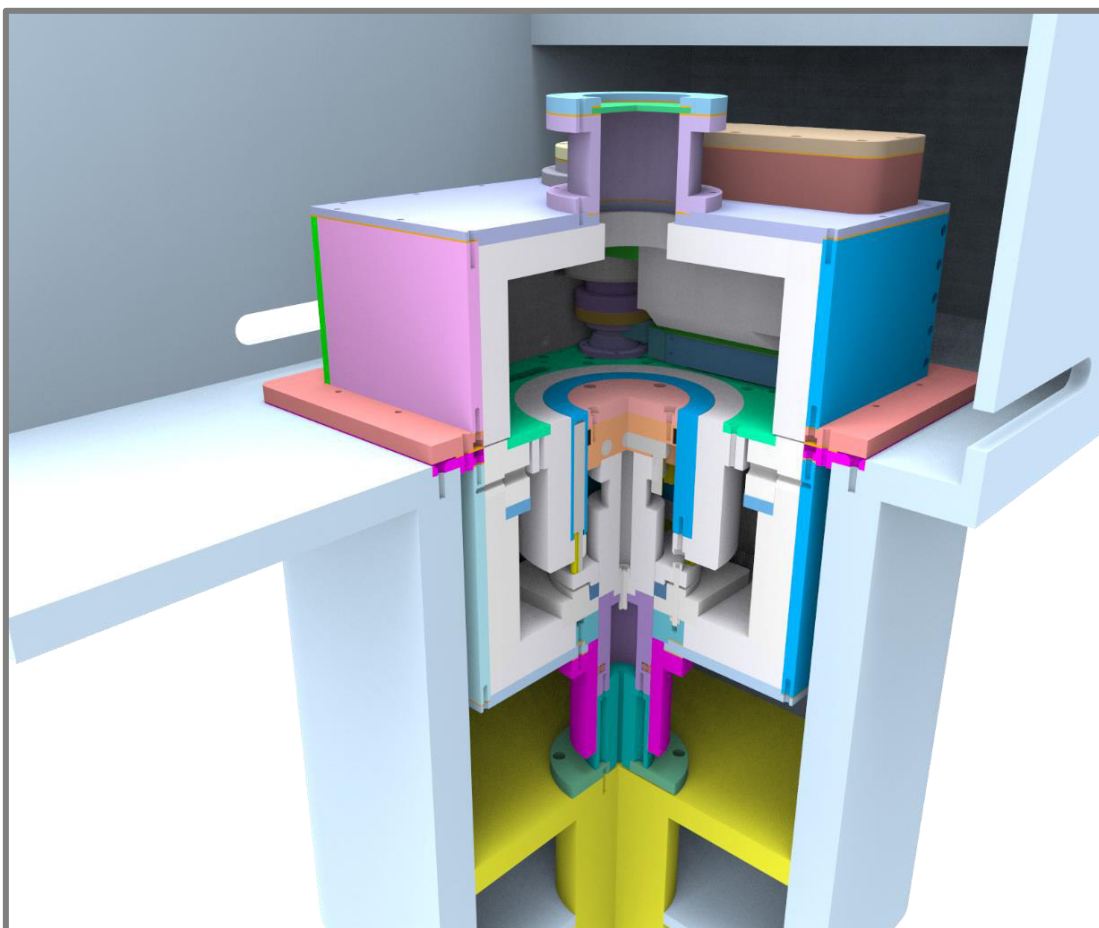
Tento návrh experimentální komory vychází z první varianty, kde zůstal zachován koncept systému pro ohřev a tepelné izolace. Pro zajištění přetlaku uvnitř komory byl první návrh doplněn o opláštění tvořené součástmi *víka* a *vany* (obr. 26). Toto opláštění, kromě těsnění tlaku, navíc slouží pro zabránění šíření teploty z experimentální komory. Mezi *pístem* a *vanou* musí být těsnění pro zajištění těsnosti komory. Komora je dělená, tak aby jí bylo možné vložit do stroje. V horní části *víka* je umístěno *laserové okno* pro průchod paprsku laseru na *stavěcí desku*, kde probíhá tisk. Díky přetlaku se sníží množství procesních emisí, ale i tak je nutné zajistit jejich odvod. Komorou tedy musí proudit inertní atmosféra.



Obr. 26 Schéma přetlakové a temperované experimentální komory

4.2.2 Konstrukce přetlakové a temperované komory

Model experimentální komory umístěné v prostoru 3D tiskárny je zobrazen na obr. 27. V konstrukčním návrhu byly vyřešeny všechny funkční celky. Nejistota návrhu spočívá v nutnosti použití *laserového okna*, které není stavěné do vysokých teplot a muselo by být chlazeno proudem inertní atmosféry. Také není jisté, jaký vliv bude mít průchod paprsku laseru přes druhé laserové okno na jeho výkon. Přívod inertní atmosféry a vytvoření přetlaku v návrhu nebylo řešeno.



Obr. 27 Model vyhřívané a temperované experimentální komory

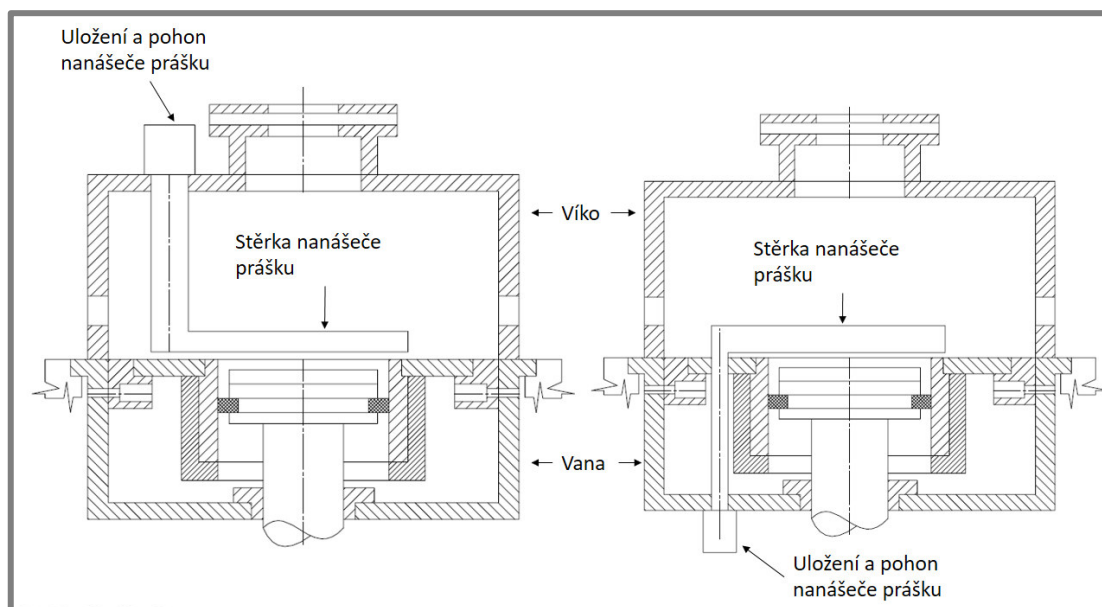
Těsnění pístu (obr. 26) musí zaručit těsnost mezi pohybujícím se *pístem* a statickou *vanou* i ve vysoké teplotě, proto bylo rozděleno do dvou fází na těsnění teploty a tlaku. Pro těsnění teploty bylo použito těsnění z expandovaného grafitu a pro těsnění tlaku pístní těsnění z PTFE. Použité pístní těsnění je vhodné pro pomalé pohyby, protože nedochází k slick-slip efektu a jeho provozní teplota je maximálně 100 °C [14]. Pro utěsnění *víka*, *vany* a jednotlivých jejich komponent šroubovaných k sobě bylo použito ploché těsnění z expandovaného grafitu vyřezané do požadovaného tvaru.

4.2.3 Systém pro nanášení prášku

Vzhledem ke konstrukci experimentální komory byl navržen jednoduchý mechanický nanášec prášku, který při roztírání prášku koná rotační vratný pohyb. Prášek je dávkován vždy v základní poloze, kde je před stěrku nasypána dávka potřebná pro celou vrstvu. Pohybem stěrky je pak prášek rozetřen po ploše tisku. Z důvodu předpokládané vysoké teploty uvnitř komory není možné pohon ani jinou elektroniku umístit do vnitřních prostorů. Hřídel pohonu nanášeče proto byla vyvedena ven z komory a pohon byl umístěn na *víko* z vnější strany. Zásobník prášku je umístěn na stěně *víka*. Při použití externího zásobníku je výhoda v nižším zatížení uložení nanášeče od vlastní váhy prášku.

Umístění nanášeče prášku

Jedna z variant je jeho uložení na *desku stavby* (Obr. 26). Vyřešení uložení nanášeče na *desku stavby* získáme výhodu v nastavování stěrky rozhrnující prášek. Při sundaném *víku* komory je možné jednoduše stěrku nastavit do požadované výšky a úhlu. Nevýhoda je v umístění vodících ložisek uvnitř komory. Tyto ložiska tedy budou teplotně namáhána. Další variantou je uložit nanášec prášku do *víka* (obr. 28 vlevo). Hlavní výhodou je umístění vodících ložisek mimo komoru, kde nebudou teplotně namáhána. Ovšem nevýhoda je v nemožnosti nastavení výšky stěrky a úhlu po spojení *víka* a *vany* komory k sobě. Stěrku by bylo možné nastavit až po opětovném odšroubování *víka*. Poslední možností je uložení pohonu a vedení nanášeče do *vany* komory dle schématu (obr. 28 vpravo). Zde je také uložení mimo komoru, ale komorou je nutné vést dlouhou hřídel, která se bude vlivem teplotní roztažnosti a gravitačních sil prohýbat a negativně ovlivňovat přesnost nanášení.



Obr. 28 Schéma možných uložení nanášeče prášku.

4.3 Zhodnocení konceptních řešení

4.3

Bylo vytvořeno několik konceptů experimentálních komor, které se od sebe liší dosažitelnými podmínkami. Při výběru optimální varianty byly zohledněny možnosti přínosu výzkumu, který na zařízení bude probíhat.

První varianta vyhřívané komory je navržena pro ohřev prášku až do teploty 600 °C. S takto vysokou teplotou předehřevu bude možné studovat obtížně svařitelné materiály a materiály s vysokým bodem tání. Díky ohřevu prášku dojde k snížení teplotního gradientu mezi místem dopadu paprsku laseru a okolním materiálem.

Druhá varianta temperovaná a přetlaková komora je navržena na přetlak až 0,2 MPa a teplotu 600 °C. Tato komora by navíc oproti předchozí variantě umožnila výzkum zpracovatelnosti lehkých slitin např. slitin hořčíku metodou SLM za vyšších tlaků, kde je předpoklad v nižší tvorbě spalín. Tato varianta byla dopodrobna zpracována a byl vytvořen konstrukční model. Nejistotou v návrhu zůstalo použití laserového okna v horní části komory a těsnění pohyblivého pístu.

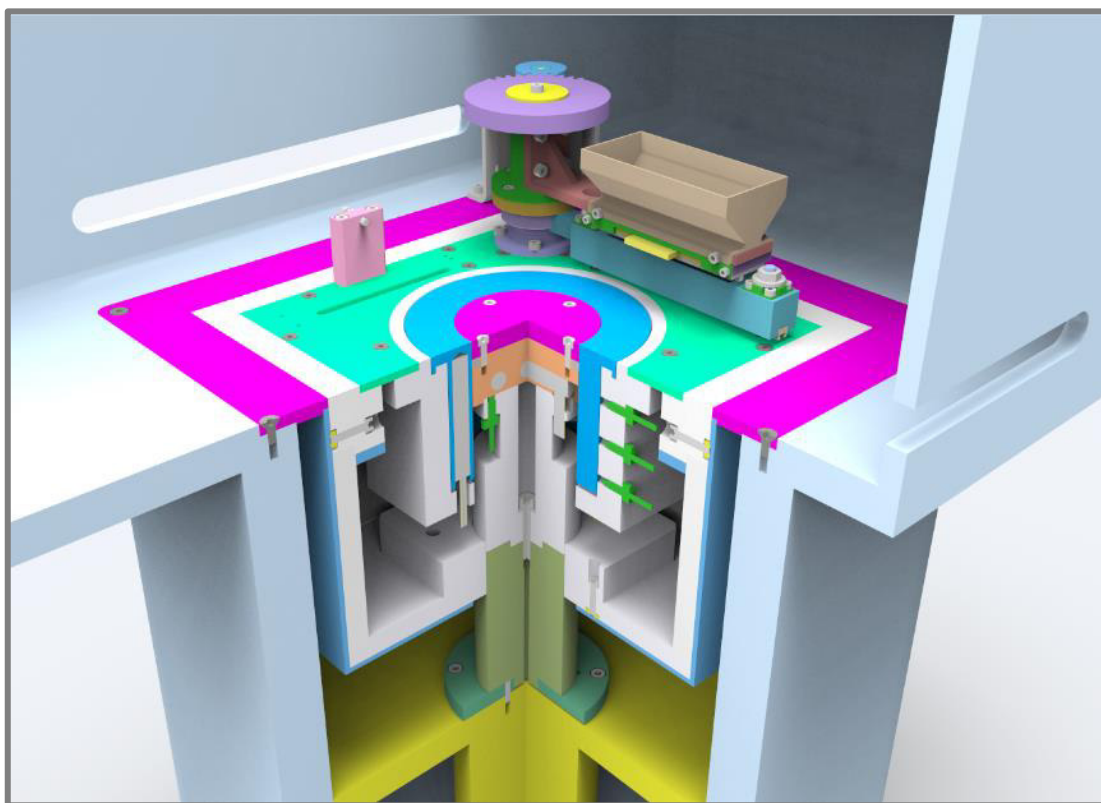
V průběhu konstrukce přetlakové a temperované experimentální komory se ukázalo, že pro stavbu dílů z lehkých slitin je více než přetlak důležitý dokonalý odvod procesních spalín [15]. Proto bylo rozhodnuto upustit od požadavku na přetlakovou experimentální komoru. Díky tomu bude celé řešení levnější a relativně jednodušší. Odpadá zde problém s laserovým sklem, které by mělo vliv na laser jím procházejícím. Navíc se ulehčí odvod spalín. V přetlakové komoře by byla schopnost rychlého odvodu spalín vzhledem k malým prostorům uvnitř omezena.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po identifikaci prostoru procesní komory 3D tiskárny SLM 280HL a výběru procesních parametrů, které bude možné experimentální komorou ovlivnit, se přešlo k samotné konstrukci. Při návrhu bylo postupováno od schématu po konstrukční návrh experimentální komory s následným výběrem vhodných materiálů. Zároveň s konstrukcí probíhal návrh systém ohřevu a výběr vhodné tepelné izolace. Funkce tepelné izolace byla ověřena MKP analýzou šíření tepla. Posledním krokem byla samotná výroba a testování navrhnutého zařízení.

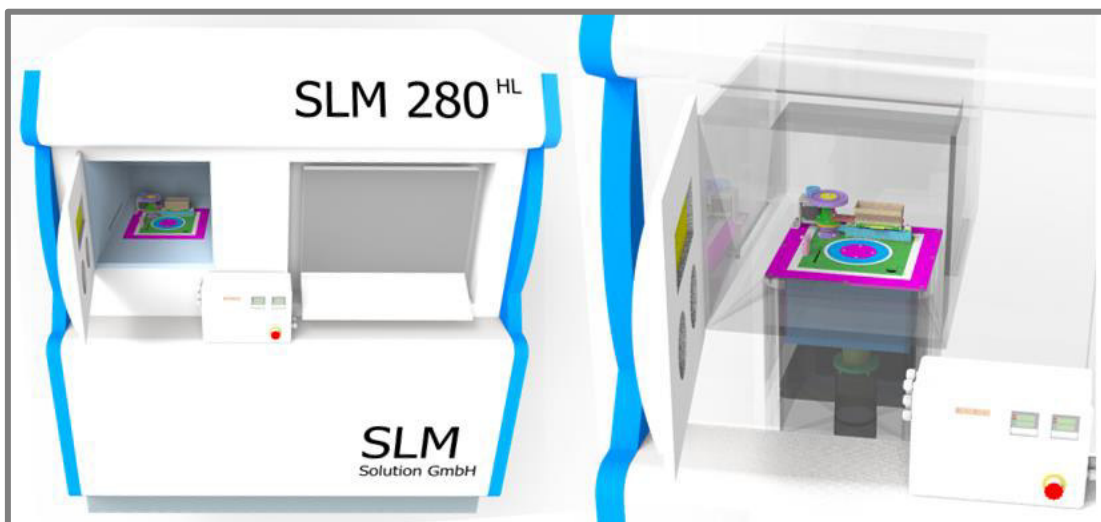
Experimentální komora je navržena na ohřev do teploty 600 °C s vlastním poháněným otočným systémem pro nanášení prášku. Model komory usazené v rámu stroje je zobrazen na obr. 29, pro viditelnost vnitřních částí je model zobrazen v řezu.

Je zde předpoklad, že s takto vysokou teplotou předehřevu bude možné studovat obtížně svařitelné materiály a materiály s vysokým bodem tání. Díky ohřevu prášku dojde ke snížení teplotního gradientu mezi místem dopadu paprsku laseru a okolním materiálem.



Obr. 29 Čtvrtinový řez modelem komory usazené v rámu 3D tiskárny

Experimentální komora bude vkládána do prostotu procesní komory 3D tiskárny místo redukčního rámečku. Vizualizace usazené experimentální komory v pracovním prostoru je zobrazena na (obr. 30 vlevo). Na obr. 30 vpravo je pak rám zprůhledněn tak, aby byly vidět skryté části. Veškerá elektronika potřebná pro řízení ohřevu bude umístěna v plastovém boxu.



Obr. 30 Experimentální komora vložena v pracovním prostoru tiskárny SLM 280HL

5.1

5.1 Konstrukce vyhřívané komory

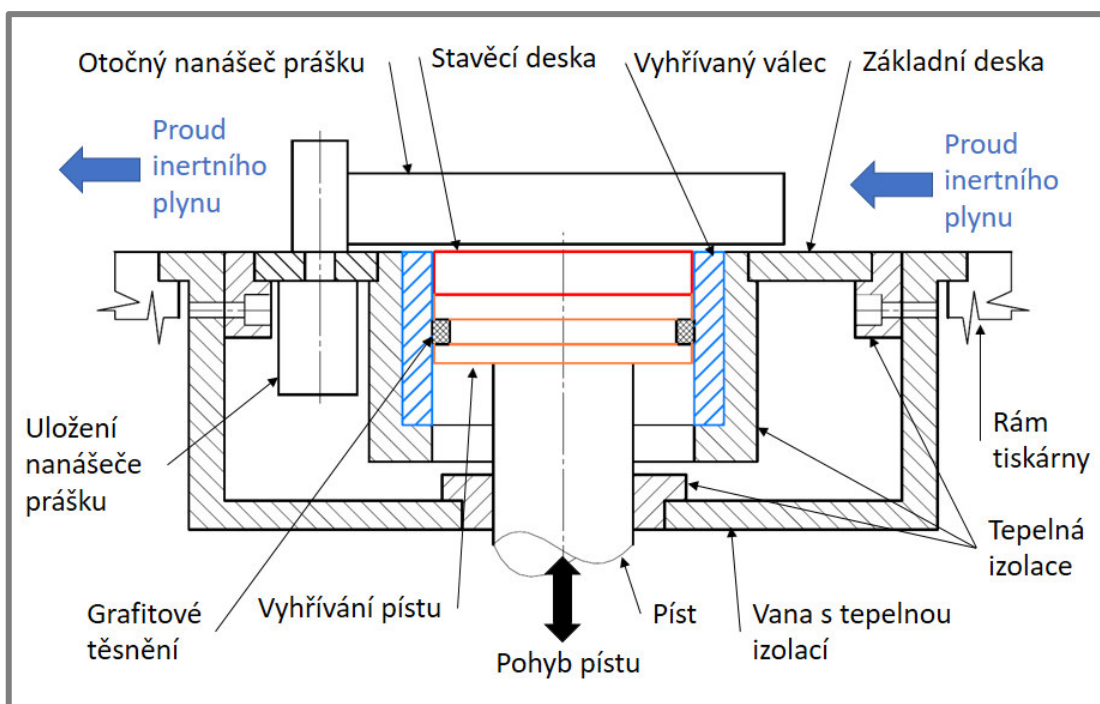
Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, tak zařízení bude vkládáno do prostoru komory tiskárny SML 280HL. Tím je možné využít mechanismus pro přesný posun platformy na kterou je tisknuto, systém dodávky inertní atmosféry a laser tiskárny.

Ve čtvrté kapitole je popsán prostor, který je pro konstrukci experimentální komory k dispozici. V následujících částech této kapitoly je podrobně popsána konstrukce, funkce, základní části, montáž, výroba a testování zařízení.

5.1.1

5.1.1 Schéma experimentální komory

Konstrukce experimentální komory vychází z první koncepce vyhřívané komory, ale navíc obsahuje spodní opláštění pro zabránění šíření teploty mimo komoru do rámu tiskárny. Experimentální komora byla zkonstruována dle schématu na obr. 31.

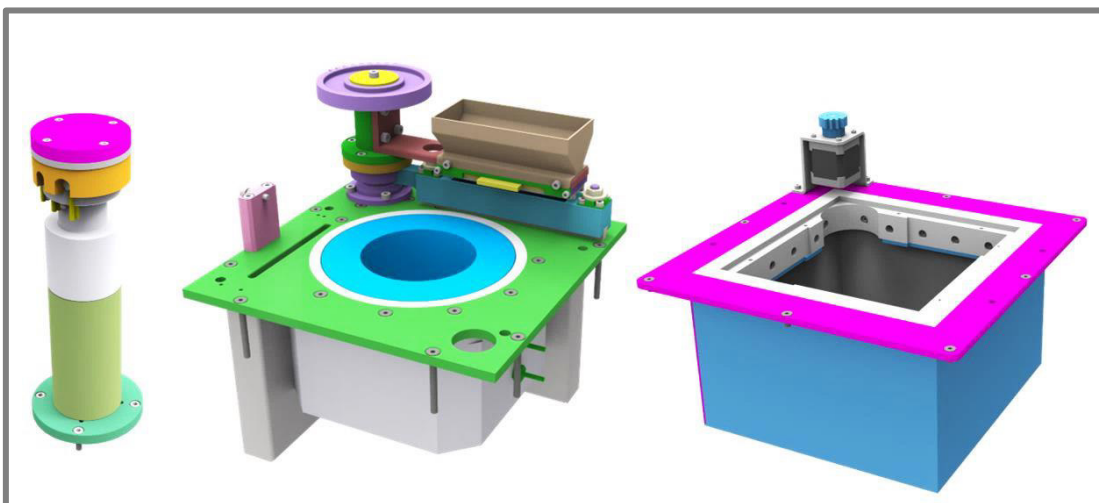


Obr. 31 Schéma konstrukčního řešení experimentální komory

Důležitými konstrukčními částmi, které bylo nutno vyřešit, jsou samotný systém pro vyhřívání, utěsnění prostoru mezi pístem a válcem, tepelná izolace a systém nanášení prášku. Utěsnění prostoru mezi pohyblivým pístem a vanou tiskárny v této variantě není tak zásadní, protože zde není požadavek na těsnění tlaku. Pouze je potřeba zamezit šíření tepla do rámu stoje. Při ohřevu na 600 °C jsou kladeny vysoké nároky na použité materiály a jejich teplotní roztažnost, se kterou musí být při konstrukci počítáno. Samozřejmě zařízení musí být smontovatelné a bezpečné pro provoz, jak pro samotnou 3D tiskárnu, tak pro uživatele.

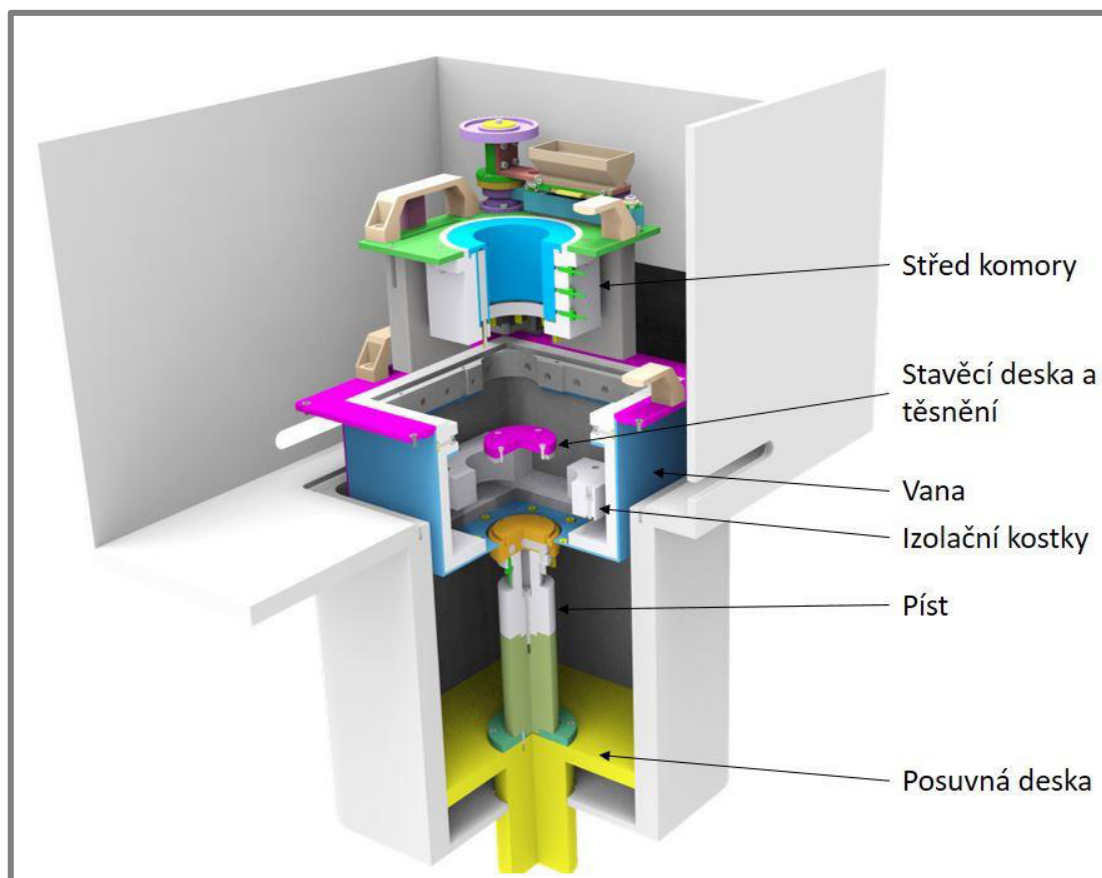
5.1.2 Hlavní části a montáž experimentální komory

Navržená experimentální komora se skládá ze tří montážních celků. Pístu, středu komory s nanášecem prášku a vany s vyzdívkou (obr. 32). V pístu jsou umístěny vyhřívací elementy, těsnění a horní část je určena pro 3D tisk součástí. Střed komory obsahuje otočný nanášec prášku s uložením hřídele, zásobníky pro odpadní prášek a systém pro vyhřívání s tepelnou izolací. Ve vaně je pak umístěna vyzdívka a pohon pro otočný nanášec prášku, kde pohyb je na nanášec přenášén ozubenými koly.



Obr. 32 zleva: Píst; Střed komory; Vana

Montáž experimentální komory probíhá následovně (obr. 33). První součástí pro sestavení je *píst*, ze kterého je demontována *stavěcí deska a těsnění*. *Píst* je připevňován na *posuvnou platformu*. Další na řadě je *vana*, která má pro usnadnění montáže připevněna plastová madla. Před její montáží je potřeba demontovat pohon pro nanášec prášku, který bude zapojen až nakonec. *vana* je nejtěžší podsestava experimentální komory, její váha je 10,8 kg. Pro utěsnění prostoru mezi *pístem* a *vanou* slouží dvě keramické *izolační kostky*, které se vloží do vyhrazeného prostoru. Následuje montáž *střední části komory*, pro usnadnění byla tato podsestava také opatřena montážními madly, která je nutné odšroubovat před začátkem tisku. *střed komory* zapadne do přesně vyfrézovaných drážek a je pojištěn osmi šrouby. Poslední součástí pro montáž je samotná *stavěcí deska* s těsněním, připojení pohonu pro nanášec prášku a zapojení elektroniky.



Obr. 33 Montáž experimentální komory

5.2 Použité konstrukční materiály

5.2

5.2.1 Ocelový materiál

5.2.1

Ocelové díly v experimentální komoře lze rozdělit na díly, které jsou vystaveny vysoké teplotě, tedy díly kolem vyhřívané desky a vyhřívaného válce a díly vystavené pouze zvýšené teplotě např. součásti nanášecího prášku a vnější obal vany.

Díly vystavené vysoké teplotě předehřevu 600 °C slouží především pro umístění topných prvků jedná se tedy o *vyhřívaný píst*, *vyhřívaný válec* a *stavěcí desku* dle schématu (obr. 31). Tyto díly musí zajistit rozvod teploty až do míst interakce s práškem a musí být z vhodné žáruvzdorné slitiny. Nanášení prášku bude probíhat přímo na vyhřívané součásti, proto je zde kladen požadavek také na nízký koeficient teplotní roztažnosti, aby bylo možné zaručit přesnost nanesení vrstvy prášku. Na výrobu těchto součástí byla zvolena niklová žáruvzdorná slitina Inconel Alloy 718, která se používá pro svou teplotní odolnost ve vysokoteplotních aplikacích. Tato slitina dokáže dlouhodobě odolávat teplotám do 700 °C a má velice nízký koeficient teplotní roztažnosti [16].

Na součásti a spojovací materiál nacházející se ve zvýšené teplotě byla zvolena korozivzdorná ocel 1.4301, pro její dostupnost a snadné opracování. Tuto ocel lze dlouhodobě používat do teploty 450 °C [17]. Vlastnosti vybraných ocelových materiálů lze vidět v tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti ocelí v závislosti na teplotě Inconel alloy 718 [16] a 1.4301 [17]

Teplota (°C)	20	100	200	400	600
Inconel alloy 718					
Hustota (kg·m ⁻³)	8220				
Youngův modul (GPa)	200	195	190	179	167
Poissonova konstanta (-)	0,294	0,286	0,28	0,271	0,277
Koeficient tepelné roztažnosti (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	12,5	13	13,5	14,2	14,9
Koeficient tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	11,4	12,6	14,4	17,4	20,6
Měrná tepelná kapacita (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	435				
1.4301					
Hustota (kg·m ⁻³)	8000				
Youngův modul (GPa)	200	194	186	172	150
Koeficient tepelné roztažnosti (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	15,5	16	16,5	17,5	18,8
Koeficient tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	15	16,3	17,5	21,5	23,4

5.2.2 Izolační materiál

Izolační materiál musí mít především nízký koeficient prostupu tepla. K tomuto účelu byl vybrán materiál od společnosti Promat s názvem Duratec 750. Duratec je bezazbestová technická keramika na bázi kalciumsilikátu [18]. Jeho hlavní výhody spočívají v dobrých tepelně izolačních vlastnostech, tepelné stabilitě, vysoké mechanické pevnosti a snadné opracovatelnosti. Duratec 750 je použitelný do teploty 1000 °C, proto byl použit na díly *tepelná izolace* a *izolace pístu* dle schéma (obr. 31). Na vyzdívku *vany s tepelnou izolací* byly použity desky o tloušťce 19 mm s obchodním názvem Monalite M1. Monalite M1 je také bezazbestová technická keramika na bázi kalciumsilikátu. Tento materiál byl zvolen pro jeho nízkou objemovou hustotu při dostačujících mechanických pevnostech a nízké tepelné vodivosti. Monalite M1 je použitelný až do teploty 850 °C. Vlastnosti obou materiálů jsou v tab. 4.

Tab. 4 Vlastnosti izolačních materiálů v závislosti na teplotě [18]

Teplota (°C)	20	100	200	400	600
Duratec 750					
Hustota (kg·m ⁻³)	1400				
Pevnost v tlaku (MPa)	55				
Koeficient tepelné roztažnosti (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	6,6				
Koeficient tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,36	0,36	0,362	0,368	0,375
Měrná tepelná kapacita (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1050				
Monalite M1					
Hustota (kg·m ⁻³)	850				
Pevnost v tlaku (MPa)	17				
Koeficient tepelné roztažnosti (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	6,1				
Koeficient tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,2	0,205	0,21	0,22	0,23
Měrná tepelná kapacita (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	960				

5.2.3 Těsnící materiál

Při tisku je prášek nanášen na *stavěcí rovinu*, kde je následně spékán laserem. Po dokončení vrstvy se *stavěcí deska* posune o tloušťku vrstvy směrem dolů a je na ni nanesena nová vrstva prášku. Mezi *stavěcí deskou* a *vyhřívaným válcem* musí být vůle pro zajištění posunu pístu (obr. 31). Pokud by se prášek dostal do této mezery, mohlo by dojít k zadření pístu uvnitř válce a znehodnocení tisku. Prostor proto musí být utěsněn vhodným těsnícím materiálem.

K tomuto účelu byl vybrán lisovaný kroužek z expandovaného grafitu o čistotě 98 % (obr. 34). Tento materiál je schopný v normální atmosféře odolávat teplotám do 550 °C a v inertní až 3000 °C, navíc na rozdíl od jiných těsnících materiálů, např. ucpávkových šňůr nedochází k odpařování materiálu vlivem tepla [19]. Nebude tak docházet ke kontaminaci prášku a prostoru pracovní komory.



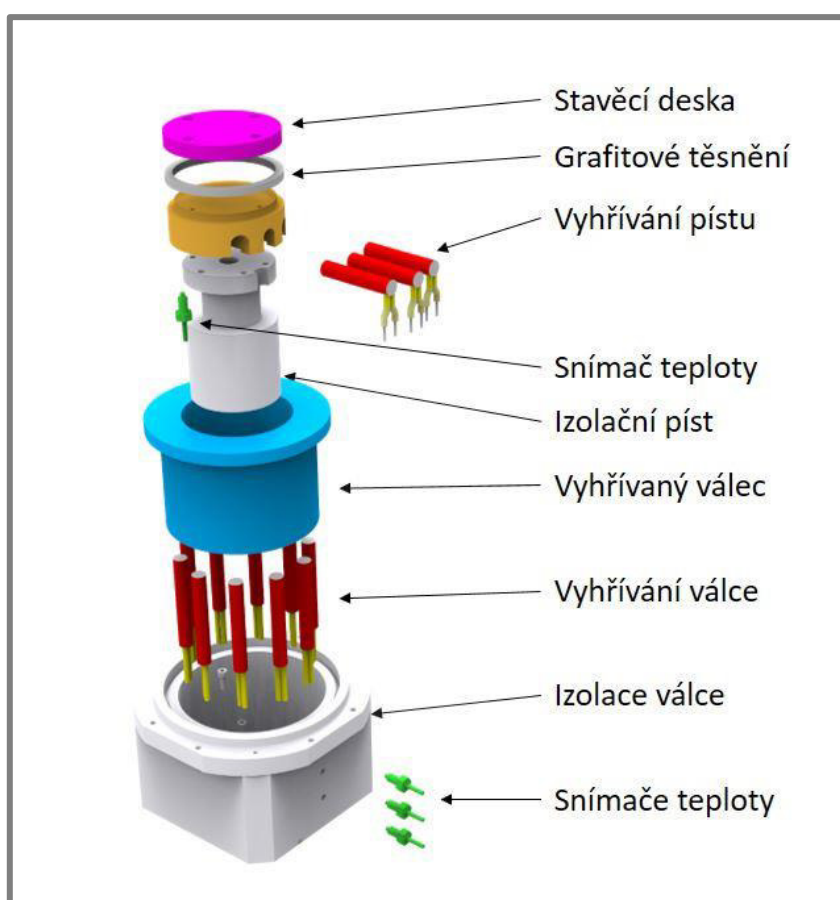
Obr. 34 Lisované grafitové kroužky z expandovaného grafitu

5.3 Systém ohřevu

5.3.1 Výběr topných těles

Pro ohřev byly zvoleny topné patrony, pro jejich vysoký výkon vzhledem k malým rozměrům. To je důležité především ve vyhřívání pístu, kde je prostor pro umístění topných elementů omezen.

Teplota ohřevu na 600 °C topnými patronami není zcela standardní, proto byly tyto patrony vyrobeny na zakázku ve společnosti Backer eltop s.r.o. Pro píst byly zvoleny tři patrony o celkovém výkonu 600 W s vývodem do boku. Pro *vyhřívání válce* bylo zvoleno deset topných patron o celkovém výkonu 1000 W s přímým vývodem. Přívodní vodiče byly opatřeny keramickými korálky, pro zajištění tepelné odolnosti.



Obr. 35 Systém vyhřívání

5.3.2 Geometrie topných těles

Geometrie topných těles vychází z požadavku na homogenní rozložení teplot v prostoru stavby dílu. Proto byly topné patrony umístěny, jak ve *vyhřívané desce*, tak i ve *vyhříváném válci* (obr. 35). Toto uspořádání zajistí homogenní ohřev prášku při tisku, i pokud píst bude v maximální hloubce 50 mm od *stavěcí roviny*.

Průměr *Stavěcí desky* je dán požadavkem na minimální rozměry výrobitelného dílu (50x50x50) mm, její referenční průměr je tedy 75 mm. Součásti pístu mají rotační tvar, z důvodu lepší dostupnosti těsnění a jednodušší výroby. Dalším faktorem, který významně ovlivnil geometrii topných těles, byla vlastní velikost topných patron, kde nejmenší vyráběný průměr patrony pro daný výkon je 10 mm a minimální délka 50 mm. Do dílu *vyhřívané desky*, vzhledem k jejím rozměrům, byly umístěny pouze tři topné patrony a do *vyhříváného válce* pak deset patron rovnoměrně rozložených po celém obvodu. To proto, aby byl tento díl vyhříván homogenně.

Pro výrobu bylo potřeba zjistit teplotní roztažnost jednotlivých dílů, aby mohla být zvolena správná vůle mezi *vyhřívanou deskou*, *stavěcí deskou*, *vyhříváním válcem* a *tepelnou izolací* kolem *vyhříváného válce*. Koeficient teplotní roztažnosti je proměnlivý s teplotou, proto byly deformace jednotlivých dílů určeny MKP teplotně deformační analýzou v softwaru ANSYS Workbench 14.5.

- **Deformace stavěcí desky**

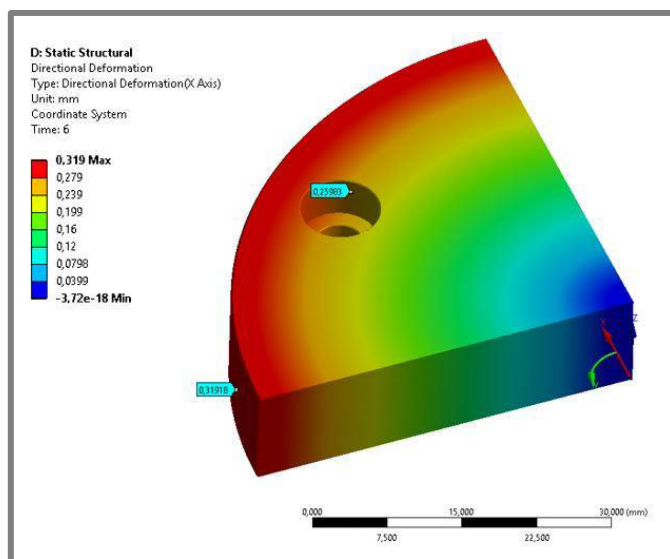
Stavěcí deska bude vyráběna z materiálů v závislosti na tisknutém prášku. Základním předpokladem je tisk z hliníkových, ocelových a titanových prášků. Pro každý materiál je tedy potřebná destička se stejným, nebo alespoň podobným koeficientem teplotní roztažnosti, aby nedocházelo k deformaci tisknutých vzorků. Průměr destičky musí být obroben pro každý materiál tak, aby nemohlo dojít k zadření desky uvnitř *vyhříváného válce*, jehož vnitřní průměr je 75 mm a tolerance H7.

V tab. 3 jsou materiály, pro které je spočten rozměr *stavěcí desky*. U hliníkových slitin je ohřev maximálně na 400 °C. U ostatních materiálů na 600 °C. Prostřední sloupec je pro koeficient lineární teplotní roztažnosti při ohřevu na maximální teplotu [20]. V dalším sloupci jsou výrobní rozměry *stavěcí desky* pro každý materiál. Poslední sloupec ukazuje radiální deformaci pro jednotlivé desky při ohřevu na maximální teplotu. Vůle mezi *stavěcí deskou* a *vyhříváním válcem* je vždy 0,2 mm.

Tab. 5 Roztažnost *stavěcí desky* z různých materiálů

Materiál <i>stavěcí desky</i>	Maximální teplota (°C)	Koeficient tepelné roztažnosti (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	Rozměr <i>Stavěcí desky</i> (mm)	Deformace v radiálním směru (mm)
AlSi10Mg	400	23,9	0 74 _{-0,2}	74,71
7075	400	26	0 74 _{-0,2}	74,77
316L	600	19,9	-0,1 74 _{-0,2}	74,68
TiAl6V4	600	9,3	-0,1 74,3 _{-0,2}	74,72
Inconel 718	600	viz tab. 3	-0,1 74,3 _{-0,2}	74,84

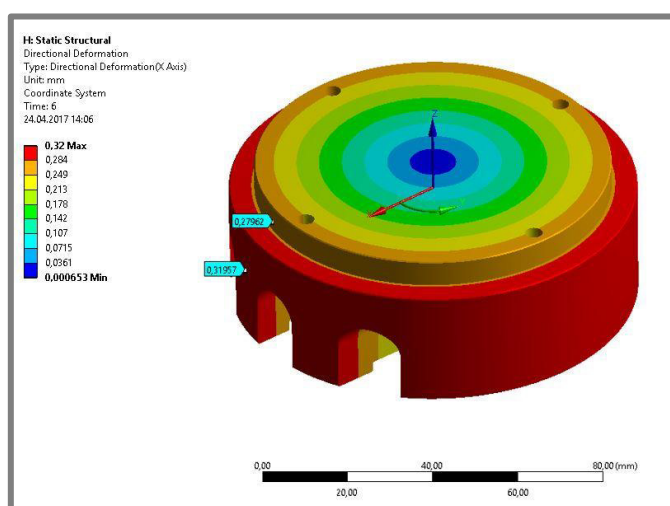
Postup výpočtu teplotních deformací *stavěcí desky* z niklové slitiny Inconel alloy 718 probíhal následovně. Materiálové charakteristiky této slitiny byly použity dle tab. 3. Součást *stavěcí desky* je symetrická, proto pro výpočet byl použit čtvrtinový model. Konečně prvková síť byla nastavena jako default, ANSYS tedy použil tetrahedronovou síť, velikost prvku byla nastavena na 1,5 mm. Na celý objem součásti bylo aplikováno zatížení teplotou 600 °C. Na spodní plochu součásti byla použita podpora bez tření. Sledovaným parametrem byla teplotní deformace v radiálním a axiálním směru. Výsledná maximální deformace v radiálním směru je 0,319 mm (obr. 36) a výsledná axiální deformace je 0,086 mm.



Obr. 36 Teplotní deformace *Stavěcí desky* v radiálním směru

- **Deformace vyhřívané desky**

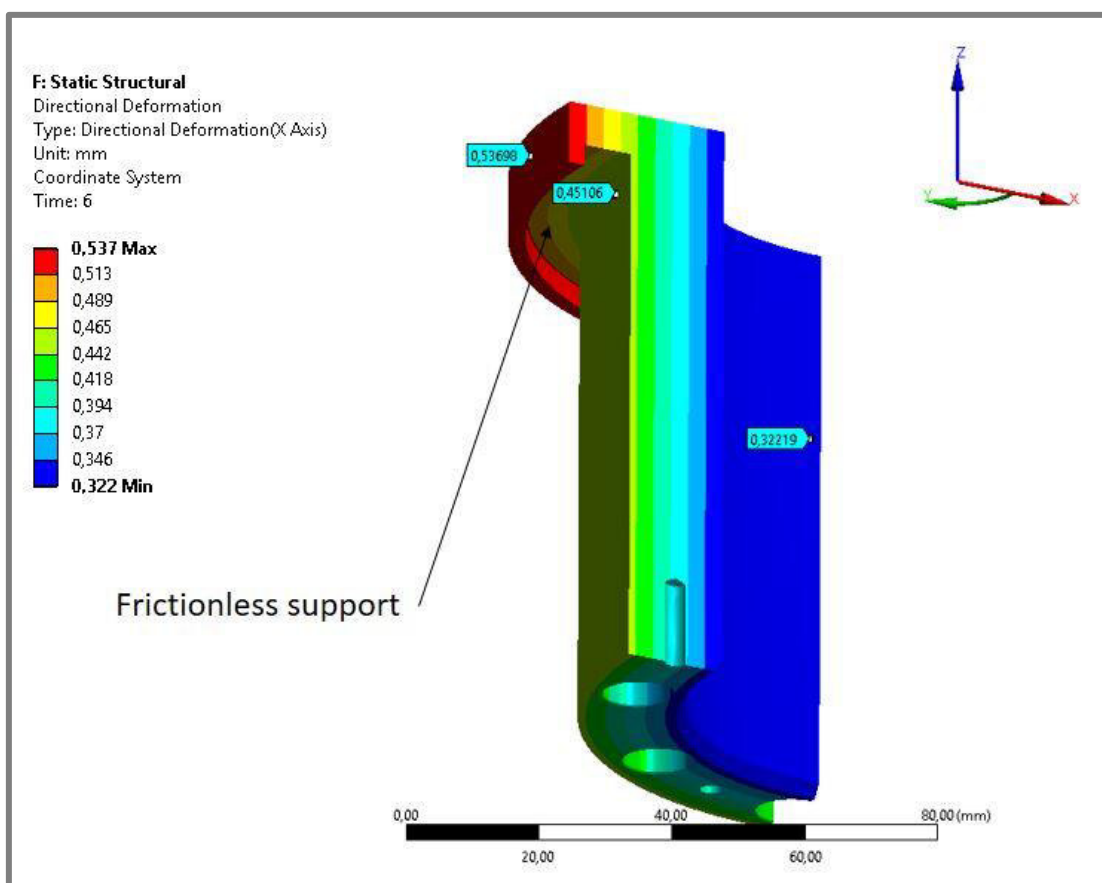
Průběh výpočtu byl stejný jako v předchozím případě. Výsledná maximální deformace v radiálním směru je 0,319 mm (obr. 37) a výsledná axiální deformace je 0,215 mm.



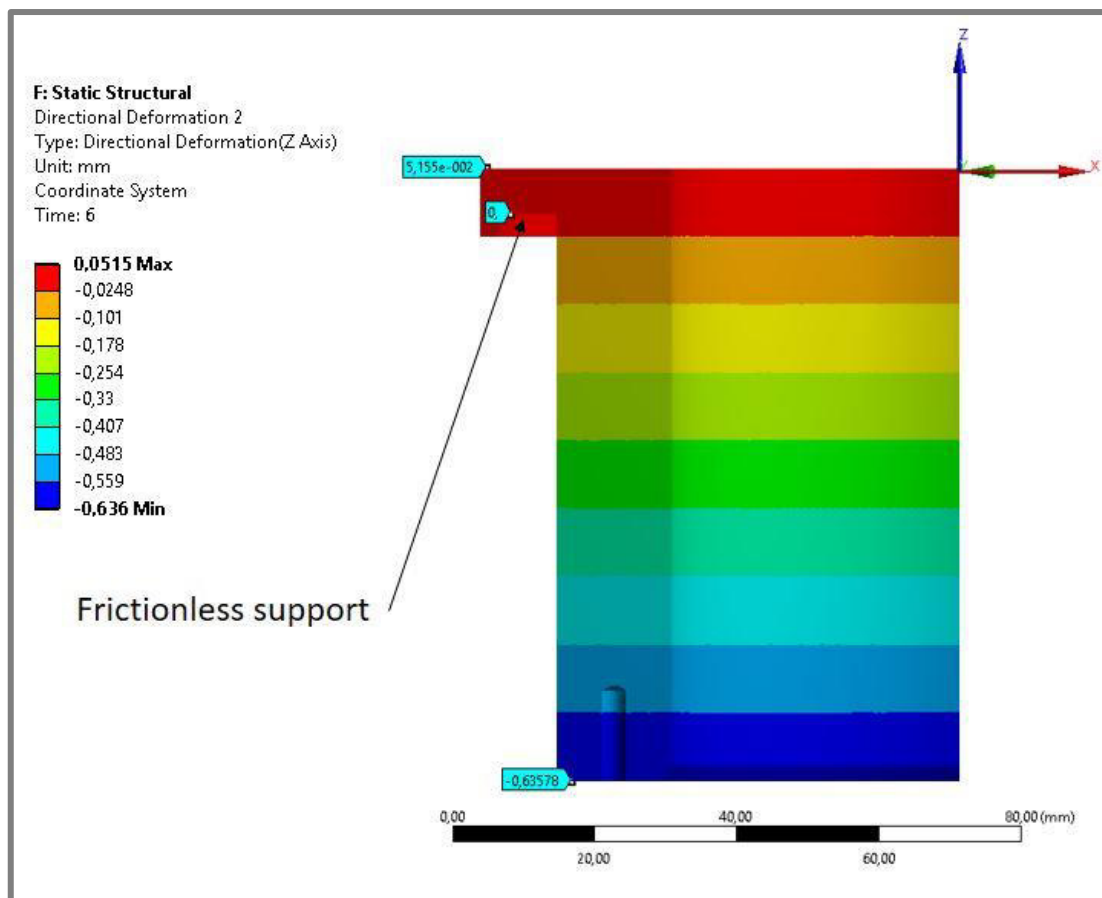
Obr. 37 Teplotní deformace *Vyhřívánoho válce* v radiálním směru

- **Deformace vyhřívaného válce**

Na součásti *vyhřívaného válce* byla použita stejná konečně prvková síť jako na předchozí součásti i stejné teplotní zatížení. Podpora bez tření byla vložena na součást dle (obr. 38), protože na tuto plochu bude opřena i v reálném zařízení. Výhodou tohoto uložení je, že se součást bude více teplotně rozpínat směrem dolů do vnitřku komory a nebude tak stoupat nad *stavěcí rovinu*. Teplotní deformace *vyhřívaného válce* v radiálním směru byla 0,45 mm na vnějším průměru a na vnitřním 0,32 mm (obr. 38). Výsledná axiální deformace byla 0,635 mm od podpory směrem dolů a 0,05 mm směrem nahoru (obr. 39).



Obr. 38 Teplotní deformace *Vyhřívaného válce* v radiálním směru

Obr. 39 Teplotní deformace *Vyhříváného válce* v axiálním směru

- **Deformace šroubů stavěcí desky**

Stavěcí deska je připevněna na *vyhřívanou desku* čtyřmi šrouby M4. Oba spojované díly jsou z niklové slitiny Inconel alloy 718, která má nižší koeficient teplotní roztažnosti oproti oceli 1.4301, ze které jsou šrouby. Bylo potřeba ověřit, zda po ohřátí součástí nebude deformace šroubu vyšší než průměr závitové díry. Zavit šroubu i díry jsou vyrobeny s vůlí v toleranci 6g. Nejmenší rozměr vnitřního závitu M4-6G je 4,004 mm. Největší rozměr vnějšího závitu M4-6g je 3,996 mm. Po ohřátí na 600 °C bude vnitřní závit mít rozměr 4,021 mm a vnější závit 4,018 mm. Šroubové spojení bude tedy i v nejhorším možném případě z hlediska tolerancí mít teoretickou minimální vůli 0,003 mm.

5.3.3 Návrh výkonu topných patron

Při návrhu bylo postupováno tak, aby byl čas ohřevu z teploty 20 °C na 600 °C do 20 min. Ve výpočtu byly uvažované ztráty prostupem tepla v izolaci *vyhřívaného válce*. Výpočet je založen na kalorimetrické rovnici (rov. 1), ze které lze zjistit, kolik tepla je potřeba dodat na vyhřátí určité hmoty [21]. Pokud pak známe výkon topných těles lze jednoduše určit čas, za který se daná hmota na požadovanou teplotu ohřeje. Je nutné brát v úvahu teplotní ztráty, které daný čas prodlužují.

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

kde:

Q	J	je teplo
m	kg	- hmotnost
c	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	- měrná tepelná kapacita
T	K	- teplota soustavy na počátku a na konci

- **Ohřev pístu**

Do pístu byly umístěny celkem tři topné patrony o výkonu celkem 600 W. Následující výpočet slouží pro určení doby ohřevu pístu z počáteční teploty 20 °C na teplotu 600 °C. Reálná doba ohřevu bude delší vzhledem k neuvažování ztrát vedením, konvencí ani zářením.

Prvním krokem bylo spočtení tepla, které je potřeba dodat do soustavy pístu (rov 2).

$$Q_{p12} = m_p \cdot c_{718} \cdot (T_2 - T_1) = 1,1 \text{ kg} \cdot 435 \text{ Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}(600 - 20) \text{ °C} \\ = 2,762 \cdot 10^5 \text{ J} \quad (2)$$

Nyní už je možné určit dobu ohřevu (rov 3)

$$t_p = \frac{Q_{p12}}{W_{pp}} = \frac{2,762 \cdot 10^5 \text{ J}}{600 \text{ W}} = 460,4 \text{ s} = 7,67 \text{ min} \quad (3)$$

Ohřev pístu teoreticky bude trvat 7,67 min. Ve výpočtu nejsou zahrnuty ztráty, ale vzhledem k požadavku na ohřev do 20 min je zde velká časová rezerva.

- **Ohřev válce**

Do válce bylo umístěno celkem deset topných patron o výkonu celkem 1000 W. Následující výpočet slouží pro určení doby ohřevu válce z počáteční teploty 20 °C na teplotu 600 °C. Reálná doba ohřevu bude delší vzhledem k neuvažování ztrát konvencí ani zářením.

Prvním krokem bylo určení tepla, které je potřeba dodat do soustavy válce (rov 4).

$$Q_{v12} = m_v \cdot c_{718} \cdot (T_2 - T_1) = 2,49 \text{ kg} \cdot 435 \text{ Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}(600 - 20) \text{ °C} \\ = 6,292 \cdot 10^5 \text{ J} \quad (4)$$

Nyní už je možné určit dobu ohřevu (rov 5)

$$t_v = \frac{Q_{v12}}{W_{pv}} = \frac{6,292 \cdot 10^5 \text{ J}}{1000 \text{ W}} = 629,2 \text{ s} = 10,49 \text{ min} \quad (5)$$

Ohřev válce bude trvat 10,5 min. Ve výpočtu nejsou zahrnuty ztráty, ale vzhledem k požadavku na ohřev do 20 min je teoretická doba ohřevu dostačující.

Výhřevu na požadovanou teplotu, lze dosáhnout, pokud platí, že výkon vytápěcích elementů je vyšší nebo roven všem tepelným ztrátám. Ztráty vedením tepla v izolaci při 600 °C lze ověřit výpočtem. Materiál izolace je Duratec 750 (tab. 4). Je uvažována pouze ztráta válcovou stěnou. Teplota na vnitřní ploše stěny je 600 °C a na vnějšku 20 °C. Prvním krokem je výpočet odporu proti vedení tepla (rov. 6) [21].

$$R_v = \frac{1}{2\pi\lambda_{750}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2\pi \cdot 0,365 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}} \ln\left(\frac{0,07\text{m}}{0,053\text{m}}\right) = 0,121 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

kde:

R_v	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	je odpor proti vedení tepla
λ_{750}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	- koeficient tepelné vodivosti
r_1	m	- vnitřní poloměr válce
r_2	m	- vnější poloměr válce

Tepelné ztráty ve válci o délce L jsou (rov. 7) [21].

$$Q_{zv} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_v} \cdot L_v = \frac{(600 - 20)\text{°C}}{0,121 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} \cdot 0,09\text{m} = 430,31 \text{ W} \quad (7)$$

Tepelné ztráty vedením tepla tedy nejsou vyšší než tepelný výkon topných elementů vyhřívajících válec.

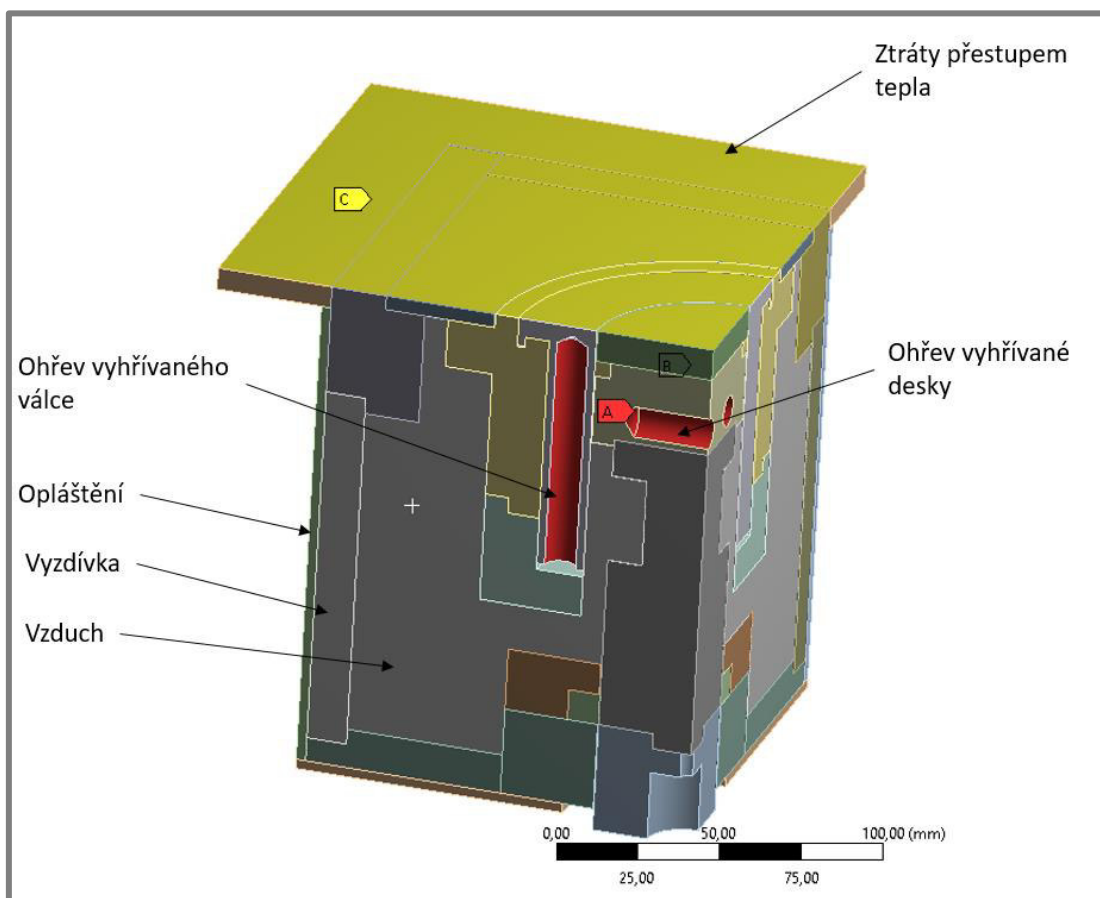
5.3.4 MKP analýza ohřevu

Ohřev bylo nutné ověřit MKP analýzou. Byla použita analýza transient thermal, kde je možné simulovat prostup tepla jednotlivými díly v čase. Tím lze ověřit například i homogenní rozložení teplot v prášku. Dále je možné ověřit, jak se bude chovat komora, pokud bude ohříván pouze píst a pokud bude ohříván píst i vnější válec.

- **Vyhřívání vyhřívané desky i vyhřívaného válce**

Předpokládaný výsledek této analýzy je určení rozložení teplot v komoře po 60 min simulace. Prvních 10 min je nastaven postupný ohřev od teploty 22 °C až do teploty 600 °C a následně výdrž na teplotě 600 °C po dobu 50 min.

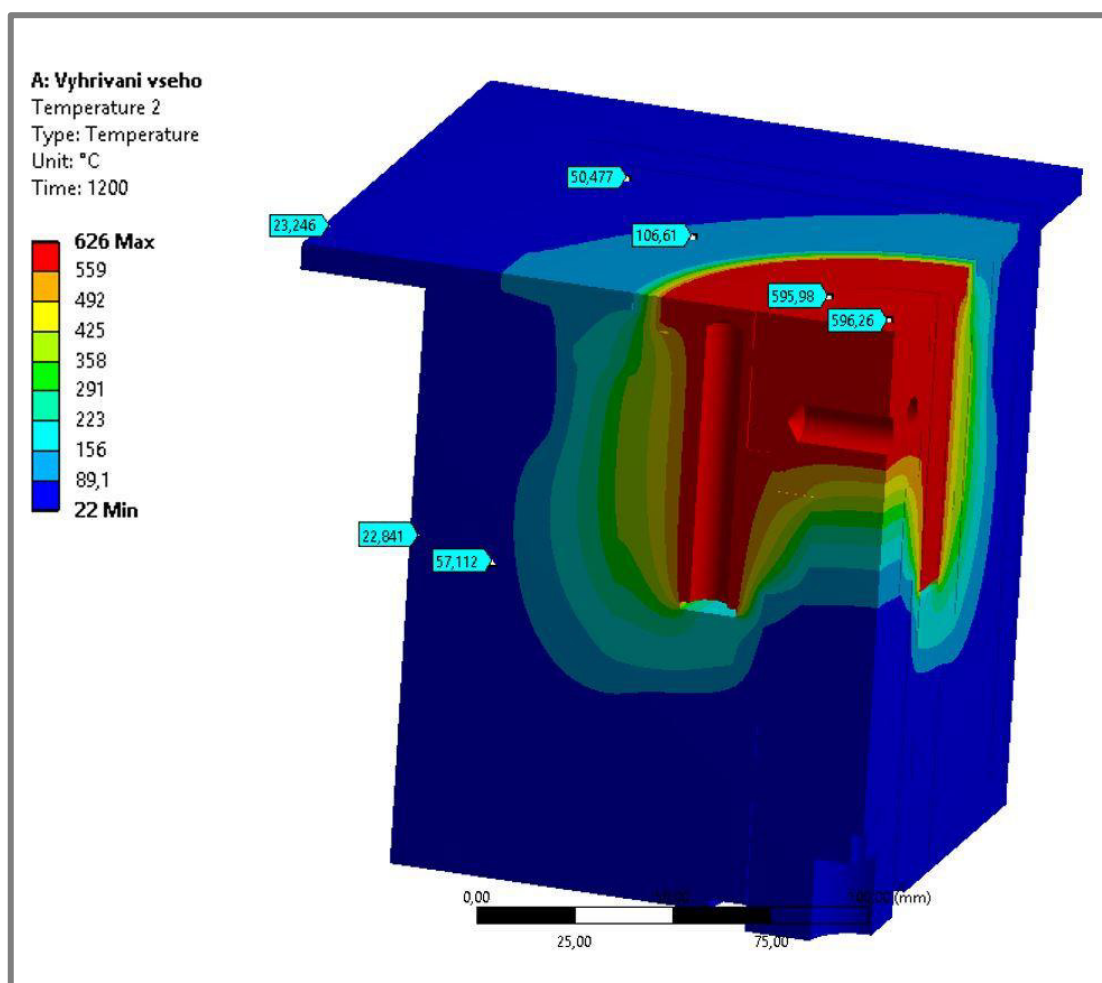
Pro analýzu byl použit čtvrtinový model pro úsporu výpočetního času (obr. 40). Materiály použité pro jednotlivé díly odpovídají charakteristikám materiálů navržených a popsanych v předchozích kapitolách. Jako materiál vyzdívky byl použit izolační materiál Monalite M1. Pro venkovní opláštění byla použita korozivzdorná slitina 1.4301. V prostoru mezi jednotlivými díly se nachází vzduch, tato součást byla vymodelována, tak aby tuto dutinu zaplnila a byly ji přiřazeny hodnoty materiálu Air vloženého z knihovny materiálů. Na vrchní plochu komory byla vložena teplotní ztráta konvekcí, kde dochází k přestupu tepla do okolního nepohyblivého vzduchu. Koeficient přestupu tepla do nepohyblivého vzduchu je v softwaru ANSYS přednastaven. Reálně bude nad touto plochou docházet k proudění inertní atmosféry, ale pro zjednodušení byl použit právě nepohyblivý vzduch.



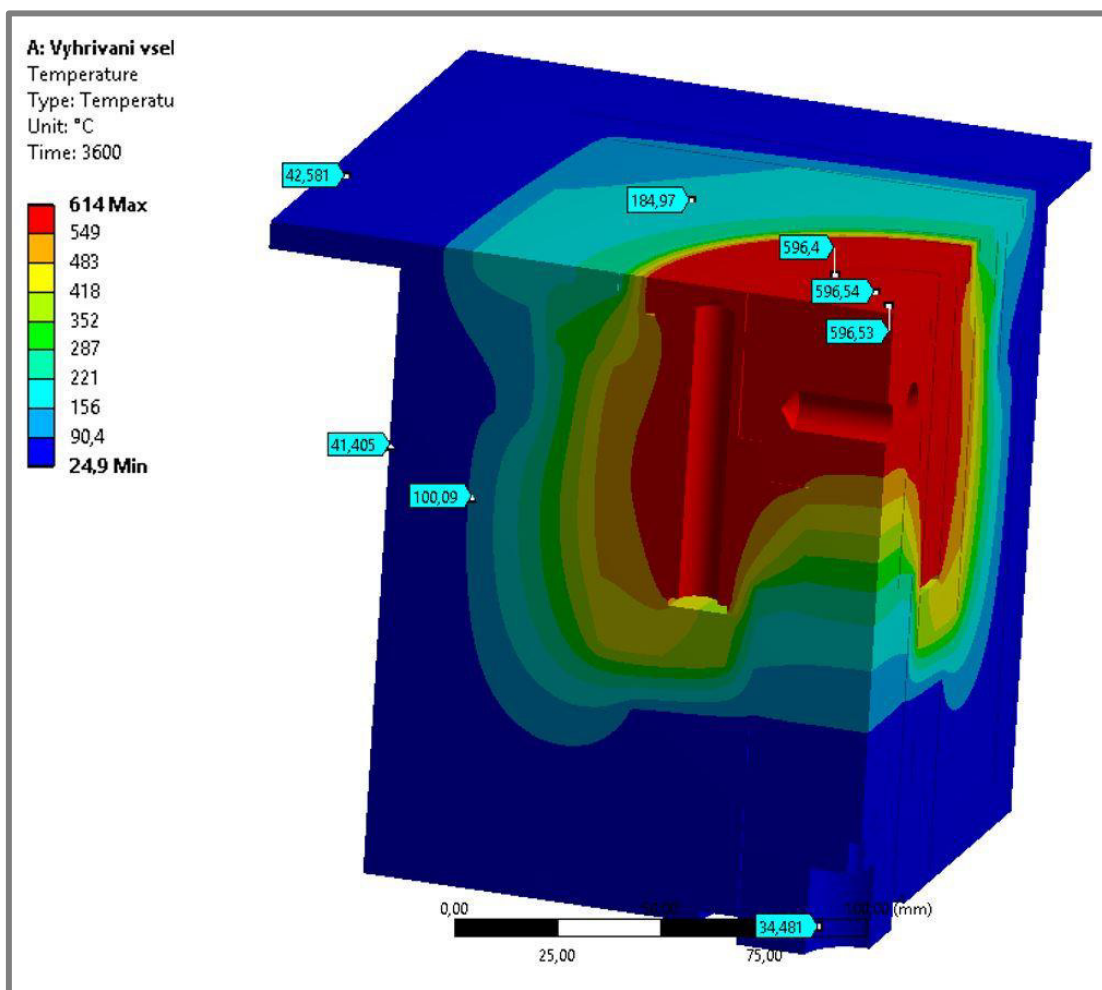
Obr. 40 Čtvrtinový model komory

Konečně prvková síť byla nastavena jako defaultní s maximální velikostí prvku 2 mm. Pro vytvoření takovéto sítě bylo potřeba 705 595 uzlů a 248 045 elementů. Teplota byla nastavena tak, že do času 10 min simulace docházelo k postupnému náběhu teploty z 22 °C právě na 600 °C a následně výdrž na teplotě 600 °C až do konečného času simulace 60 min. Místo ohřevu bylo zvoleno použít plochy v otvorech pro topné patrony.

Výsledek simulace po 20 min (obr. 41). Je zde patrné, že po této době ohřevu došlo k téměř homogennímu ohřevu desky tisku na teplotu 596 °C. Při pokračování v simulaci až do doby 60 min lze sledovat šíření teploty komorou, kde podle předpokladu izolace kolem *vyhříváného válce* odizoluje zbytek komory od vysoké teploty 600 °C. I izolace pístu plní svojí funkci a teplota se tedy nemůže šířit skrz píst. Uvnitř komory se nachází vzduch, který je izolant. Na povrch komory se po hodině ohřevu objevila teplota pouze 40 °C (obr. 42).

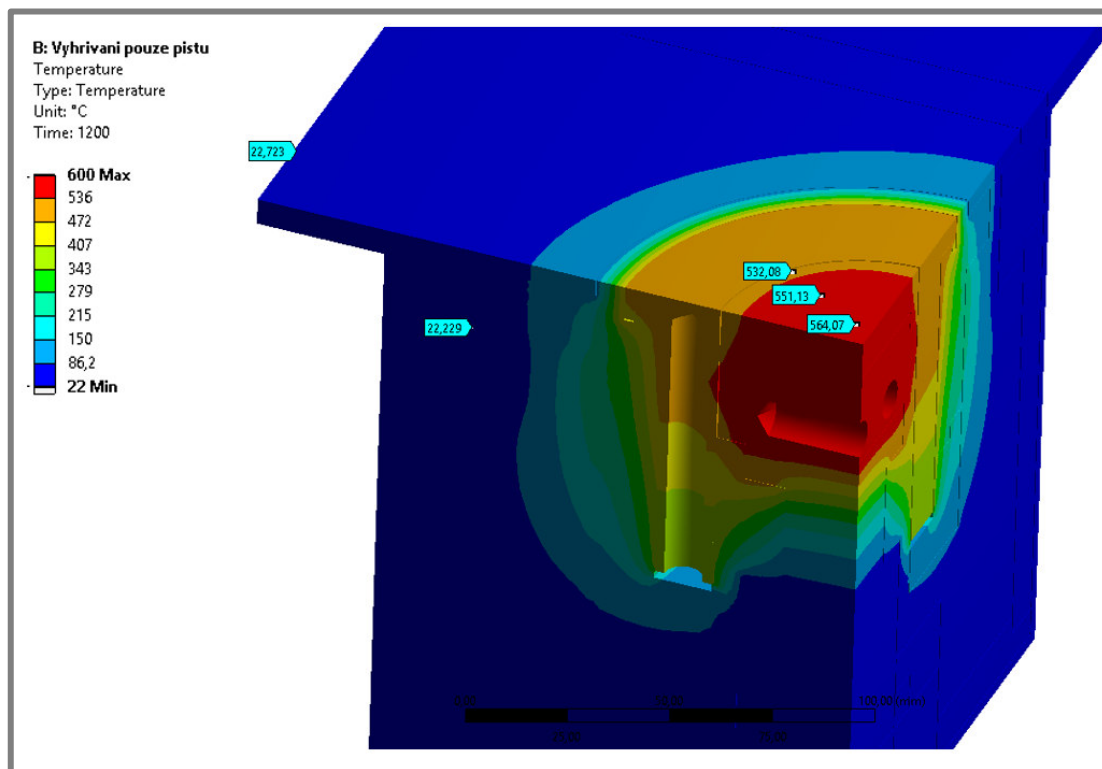


Obr. 41 Ohřev po 20 min při vyhřívání válce i pístu



Obr. 42 Ohřev po 60 min při vyhřívání válce i pístu

Pro porovnání byla vytvořena další analýza ohřevu komory. S jediným rozdílem, a to vyhříváním pouze *vyhřívané desky* vyhřívání válce bylo odstraněno. Sledovaným parametrem byla homogenita ohřevu desky, kde se ukázalo, že po 20 min ohřevu výsledek není uspokojivý (obr. 43). Teplota není na povrchu rozložena tak homogenně jako v předchozím případě použití ohřevu i válce. Teplota na povrchu dosáhla pouze 564 °C, a navíc její hodnota klesá se vzdáleností od středu. Na kraji desky tisku je teplota o více než 30 °C nižší. Výsledkem je tedy, že vyhřívání okolního válce má zásadní vliv na homogenní ohřev při použití daných vyhřívacích elementů.



Obr. 43 Ohřev po 20 min při vyhřívání pouze pístu

Cílem další analýzy bylo ověřit, zda dojde k homogennímu rozložení teplot v prášku, který zaplní stavební prostor. Práškový kov má výrazně nižší teplotní vodivost než homogenní materiál. Tepelná vodivost prášku lze spočítat dle vzorce (rov. 8) [22].

$$\lambda_p = \lambda_s(1 - \Phi) \quad (8)$$

kde:

λ_p	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	je součinitel teplotní vodivosti prášku
λ_s	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	- součinitel teplotní vodivosti pevného materiálu
Φ	-	- relativní porozita prášku

Relativní porozitu prášku lze spočítat podle (rov. 9) [23]. Hodnota relativní porozity prášku se pohybuje od 0,4 pro prášek do 0 pro pevný materiál [23]. Tato hodnota je ovlivněna velikostí částic prášku.

$$\Phi = \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s} \quad (9)$$

kde:

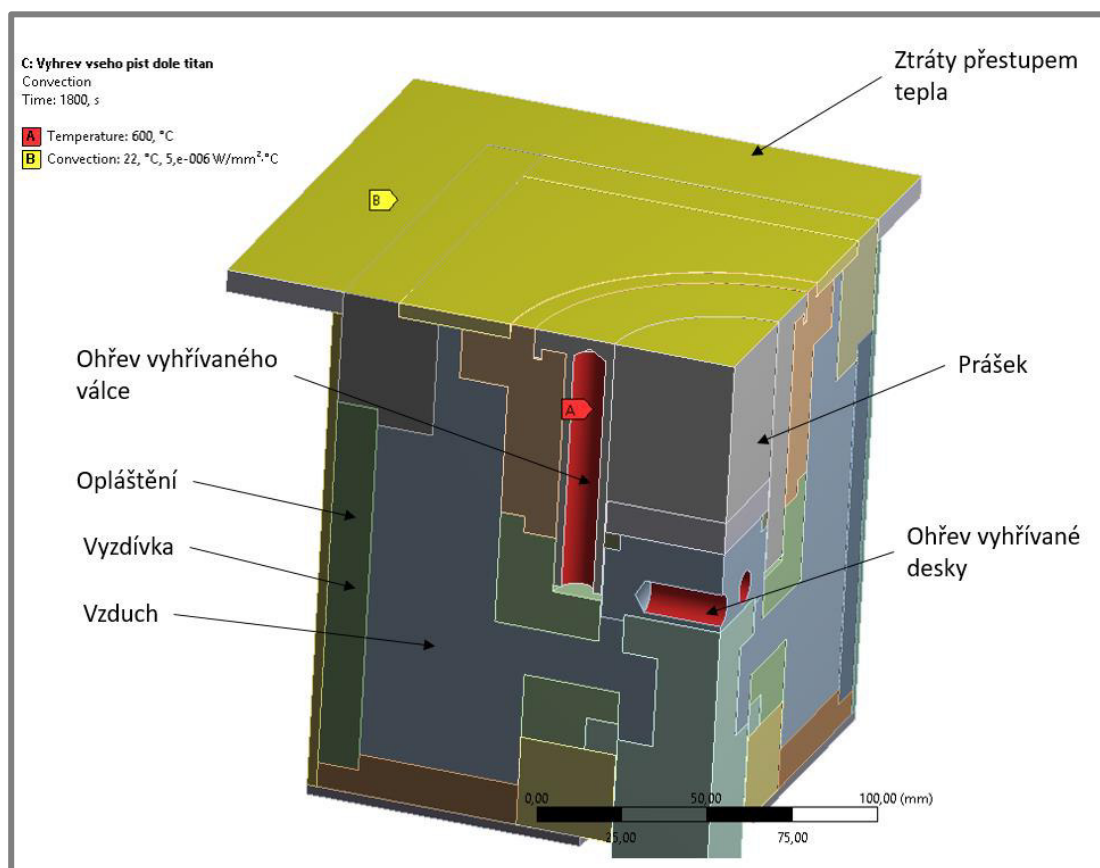
Φ	-	je relativní porozita prášku
ρ_s	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	- hustota pevného materiálu
ρ_p	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	- hustota práškového materiálu

Materiál prášku byl zvolen TiAl₆V₄. Vlastnosti tohoto prášku za různých teplot jsou uvedeny v tab. 6 [24]. Pro určení teplotní vodivosti prášku byl koeficient relativní porozity prášku zvolen 0,4.

Tab. 6 Vlastnosti materiálu TiAl₆V₄ [24]

Teplota (°C)	20	100	200	400	600
TiAl₆V₄					
Hustota pevného materiálu (kg·m ⁻³)	4420	4400	4390	4360	4325
Koeficient tepelné vodivosti pevného materiálu (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	7	7,5	8	11	15
Koeficient tepelné vodivosti prášku (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	4,2	4,5	5,2	6,7	8,5
Měrná tepelná kapacita (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	526				

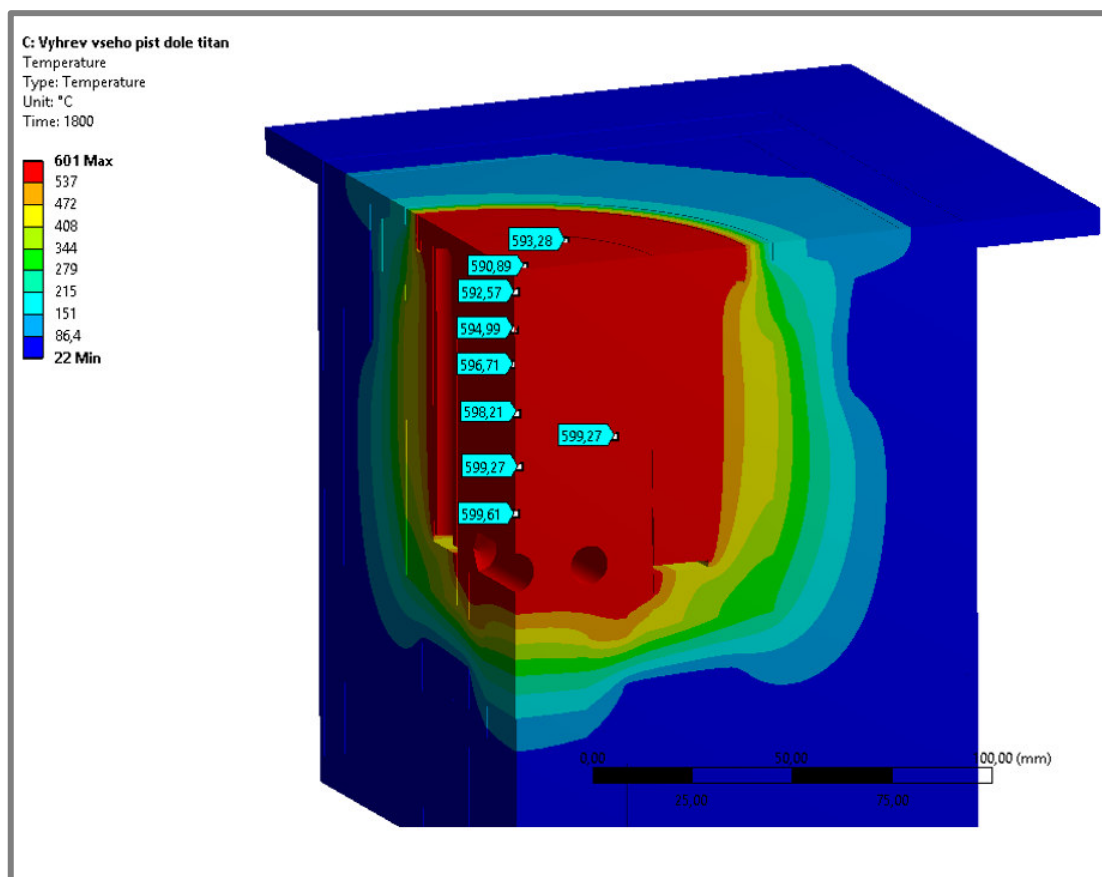
Změny oproti předchozím simulacím jsou pouze v úpravě geometrie, kde byl píst posunut do dolní polohy a na něho byl vložen další objemový díl, který má materiálové vlastnosti TiAl₆V₄ prášku (obr. 44). Vyhřívání bylo vloženo do *vyhříváného válce* i *vyhřívávané desky*.



Obr. 44 Čtvrtinový model komory s práškem

Bylo použité stejné nastavení konečně prvkové sítě i času. Sledovaným parametrem tedy bylo rozložení teplot v objemu prášku.

Odchylky teploty v objemu prášku byly pouze minimální, kdy nejnižší teplota byla po 20 min ohřevu na vrchní ploše prášku u středu pouze s rozdílem 10 °C (obr. 45).



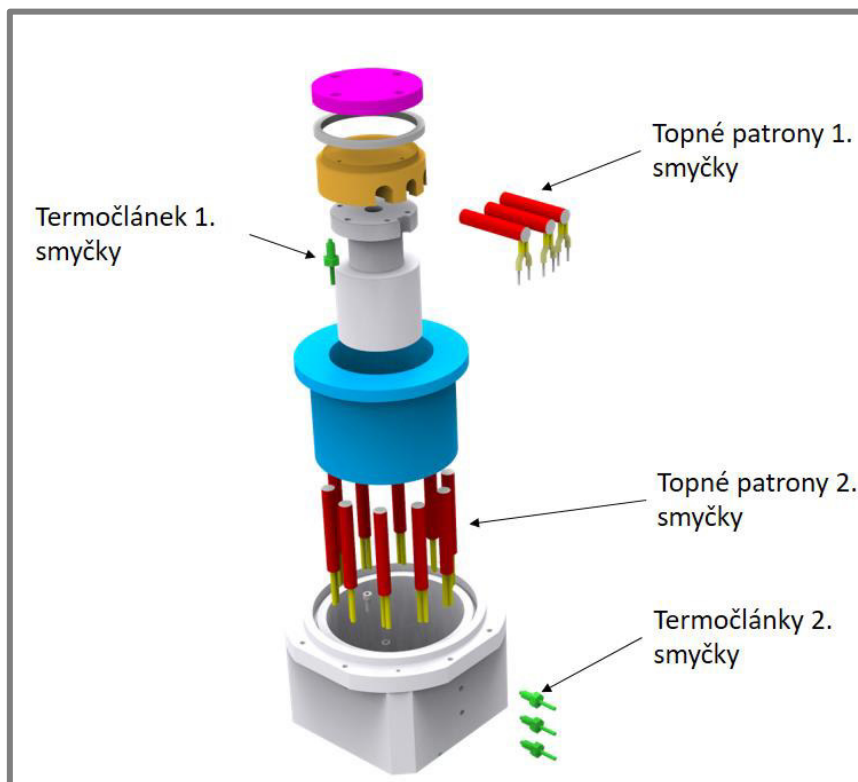
Obr. 45 MKP ověření ohřevu prášku

Provedené analýzy šíření tepla ukázaly, že pro homogenní ohřev bude nutné vyhřívat píst i vnější válec. Dále bylo ověřeno, že změna teploty na vnějším plášti komory se po hodině ohřevu na 600 °C zvedne pouze o 20 °C. Ovšem v analýz nejsou uvažovány ztráty tepla konvekcí ani radiací, poroto je výsledek pouze přibližný.

5.3.5 Řízení ohřevu

Pro řízení ohřevu na požadovanou hodnotu jsou potřeba výkonné, regulační a snímací prvky [25]. Výkonnými členy jsou topné patrony, jako regulační prvek byl vybrán PID regulátor a pro snímání teploty byly zvoleny termočlánky typu K, schopné snímání teploty až do 800 °C.

Řízení teploty bylo rozděleno na dvě smyčky. Na smyčku pro řízení teploty na pístu a smyčku pro řízení teploty ve vyhřívaném válci. Každá smyčka má svůj vlastní K termočlánek. Jejich umístění je dle (obr. 46). Pro řízení byl pro každou smyčku zvolen PID regulátor REX-C100.



Obr. 46 Systém ohřevu a regulace

Elektronické schéma zapojení

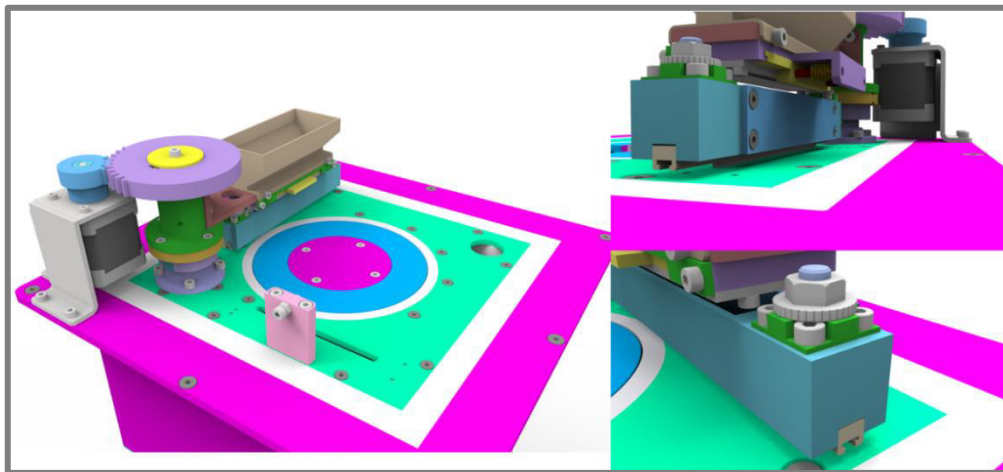
Veškerá elektronika je zapojena dle schématu viz příloha 3. Topné patrony jsou zapojeny paralelně k stykači, který je řízen pomocí regulátoru REX-C100. Pro identifikaci teploty ohřívaných součástí je na regulátor napojen snímač teploty.

Ve schématu je navíc programovatelná deska Arduino 2560, ta slouží pro zapojení přídavných termočlánků, pokud by byl požadavek na snímání teploty i v jiných místech, než jsou snímače regulátorů. Data z termočlánků se budou zobrazovat na displeji připojeném k Arduino. Data také budou posílána přes sériový port. Bude tak možné pomocí softwaru Matlab zapisovat teplotu do grafu v závislosti na čase.

Topné patrony a regulátory jsou napájeny síťovým napětím 230 V. Maximální proudový odběr při celkovém topném výkonu 1600 W je 7 A. Programovatelná deska arduino bude napájena stejnosměrným adaptérem s napětím (9-12) V, případně přes USB port.

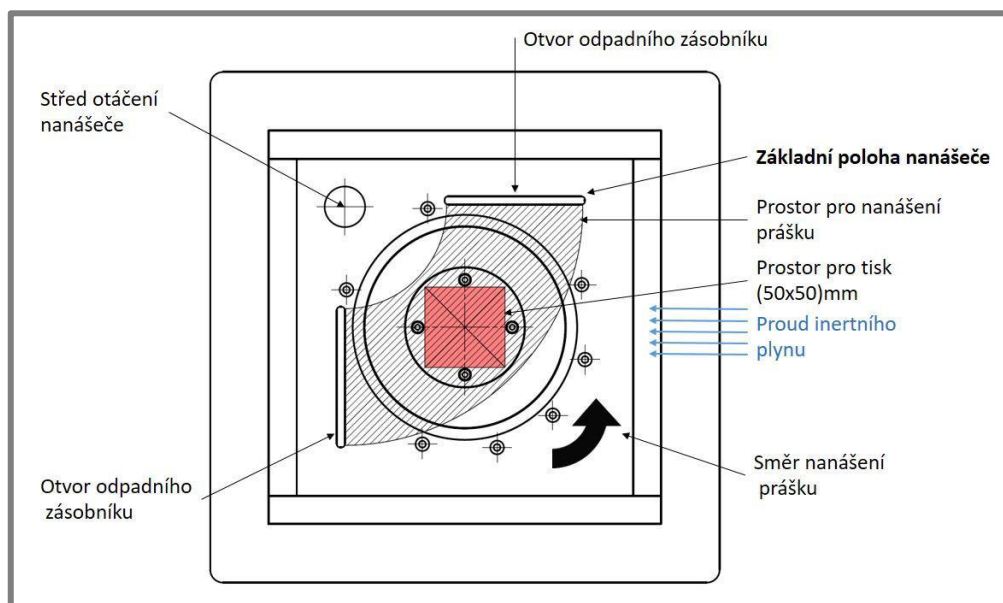
5.4 Systém nanášení prášku

Pro nanášení prášku byl zvolen rotační mechanismus (obr. 47). Jeho hlavní výhodou je nutnost uložení pouze jedné hřídele. Pro pohon byl zvolen krokový motor Nema 17 s kroutícím momentem 0,65 Nm, který je potřebný pro překonání síly od pružin při dávkování prášku. Kroutící moment je na nanášec prášku přenášen ozubeným soukolím.



Obr. 47 Otočný nanášec prášku

Při vypalování průřezu součásti laserem bude nanášec v základní poloze, tj. rovnoběžně s horním odpadním zásobníkem (obr. 48). Nanášec prášku tak nebude ovlivňovat odvod spalin. Rozprostírání prášku do prostoru probíhá proti směru hodinových ručiček, když nanášec sjede do polohy kolmé k proudu inertní atmosféry, kde přes mechanický doraz dojde k nadávkování prášku před stěrku. Pohybem zpět do základní polohy dojde k nanesení vrstvy prášku. Nevýhodou rotačního způsobu nanášení je nutnost nanesení více prášku na vzdálenějším vnějším poloměru prostoru pro nanášení.

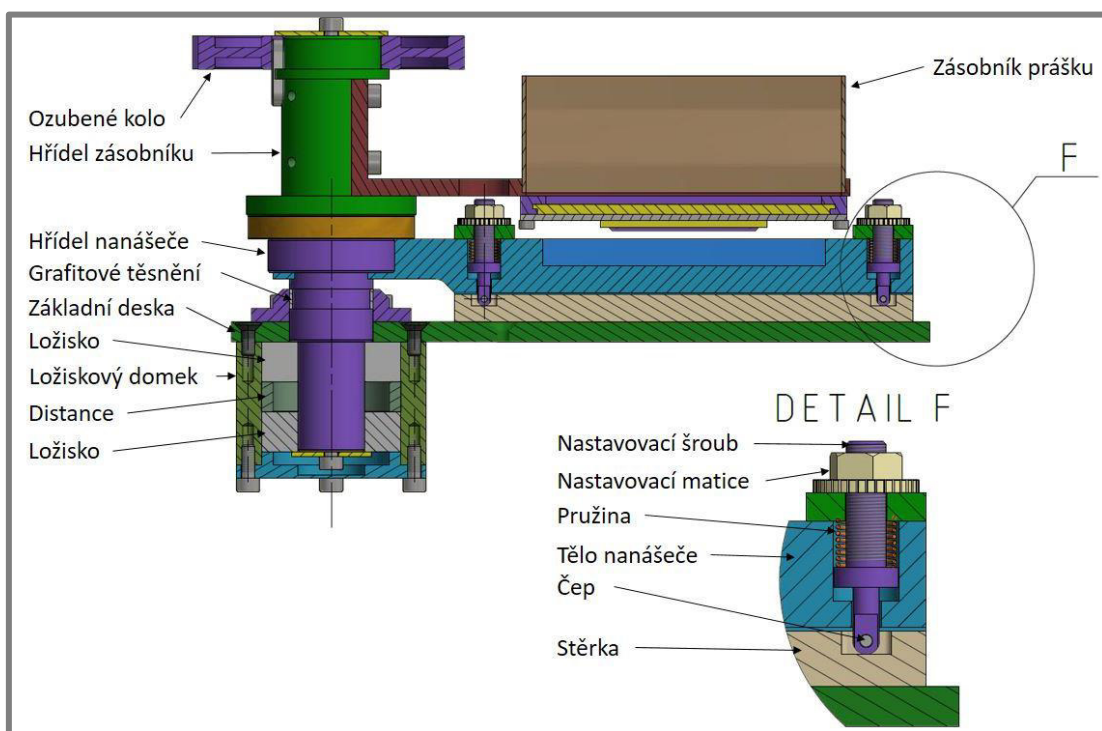


Obr. 48 Prostor pro nanášení prášku

Po zhodnocení variant uložení nanášeče, bylo rozhodnuto ustavit ho na *základní desku* (obr. 49). Hlavní výhodou tohoto uložení je v montáži, kde bude nanášeč pevně spojený s touto deskou. Další výhodou je možnost snadného nastavení *stěrky*. Pro kalibraci byly použity *nastavovací šrouby* o velikosti M6 s jemným stoupáním závitu 0,5 mm. Šrouby jsou umístěny na koncích *stěrky*, což umožňuje kalibraci v úhlu i výšce (obr. 49). *stěrka* je dotlačována pružinami, které slouží jako bezpečnostní prvek pro případ, kdy by došlo k odtržení tisknuté součásti od *stavěcí desky* a *stěrka* z oceli 1.4301 narazila do tisknutého dílu.

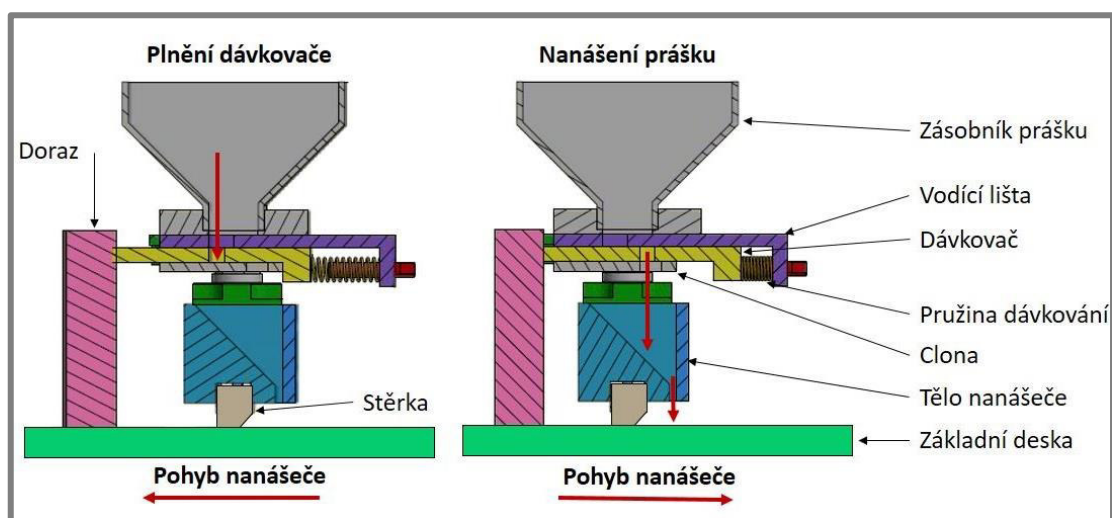
Uložení celého nanášeče prášku bude na dvě *ložiska*, uložená v *ložiskovém domku* (obr. 49). Teplota v této části komory bude nižší než v prostoru ohřevu, viz MKP analýza, proto byla zvolena ložiska 6004-2Z/VA208 od společnosti SKF, schopná pracovat do teploty až 350 °C [26].

Prášek si nanášeč bude vozit po celou dobu s sebou, což zvyšuje nároky na uložení hřídele, ale při této variantě komory bez horního víka je toto nejjednodušší řešení (obr. 49). *Zásobník prášku* je připevněn na *hřídel zásobníku*, aby nebylo *tělo nanášeče* prášku zatěžováno a nemohlo tak docházet vlivem gravitační síly k jeho průhybu.



Obr. 49 Konstrukce nanášeče prášku

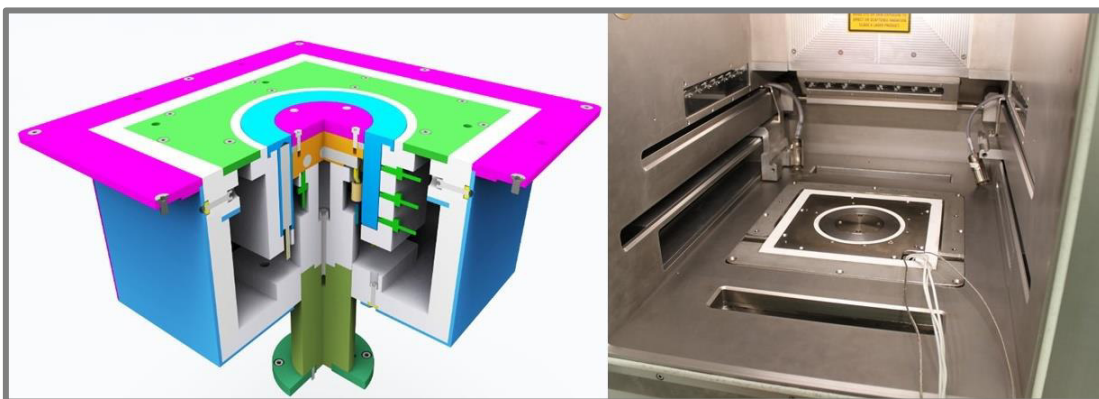
Systém dávkování prášku byl vyřešen mechanicky. Kdy součást *dávkovač* (obr. 50) zajistí dodávku prášku před *Stěrku*. Funkce *dávkovače* je následovná. Při kontaktu nanášeče s *dorazem* (obr. 50vlevo) jsou stačeny *pružiny dávkování* a *dávkovač* je posunut tak, aby otvorem v *cloně* mohl prášek propadnout skrze *tělo nanášeče* před *stěrku* (obr. 50vpravo). Systém je navrhnut tak, aby se do otvoru v *dávkovači* při maximálním nastavení vešla dávka prášku na vrstvu tloušťky 100 μm . Pro dávkování nižších vrstev, lze kalibraci provést posunutím *dorazu*. Otvor *dávkovače* má postupně se rozšiřující tvar. Tak, že na vzdálenějším poloměru od středu otáčení nanášeče je otvor větší. Dojde tak k nadávkování více prášku před *stěrku* na vzdálenějším poloměru.



Obr. 50 Systém dávkování prášku

5.5 Výroba experimentální komory

Pro úsporu nákladů a ověření navrhnuté koncepce bylo rozhodnuto nerealizovat otočný nanášec prášku. Nanášení prášku bude zajištěno upraveným stávajícím nanášecem. Realizovaná experimentální komora je zobrazena na obr. 51. Komora je připravena pro případné doplnění o otočný nanášec prášku. Fotodokumentace z výroby a montáže, a testování viz příloha 1.



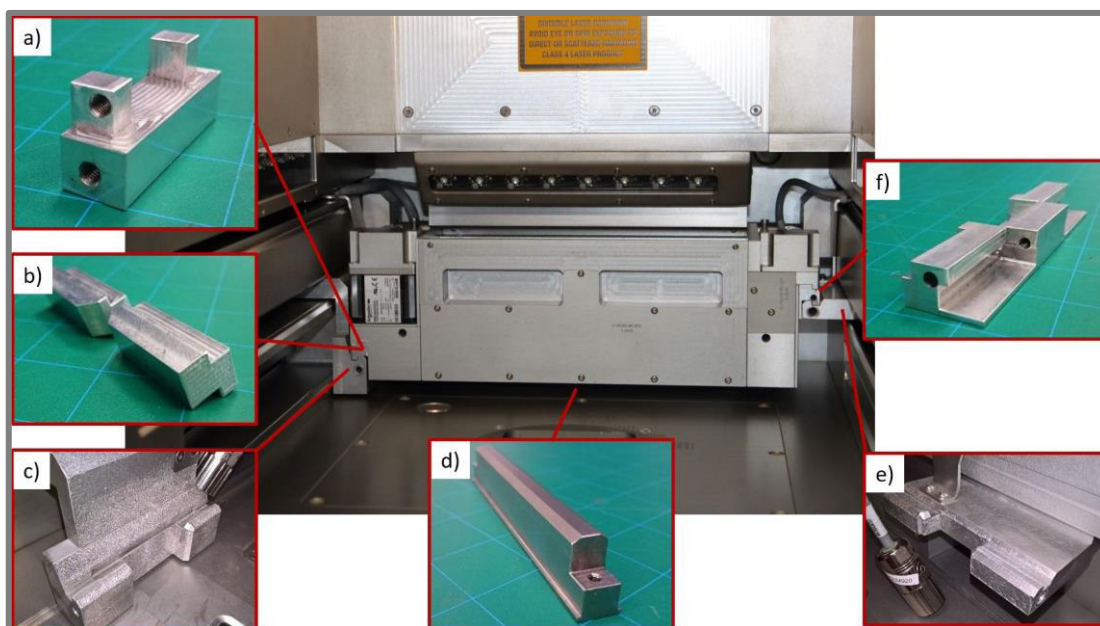
Obr. 51 Realizace experimentální komory

Snahou při výrobě bylo maximálně snížit výrobní náklady. Nicméně komora je navrhována na ohřev až na 600 °C, což klade vysoké nároky na použité materiály. Jejich cena těmto nárokům odpovídá. Nejdražšími součástmi jsou díly pro umístění topných patron, kde materiál z niklové slitiny Inconell alloy 718. Finanční prostředky naopak byly ušetřeny při výrobě izolačních součástí, kde se platil pouze materiál, obrobení bylo řešeno svépomocí. Snaha o ušetření se projevila i na elektronice, kdy regulátory a programovatelná deska Arduino 2560 byla pořízena z Číny. Celková cena zařízení byla 100 412 Kč, viz tab. 7.

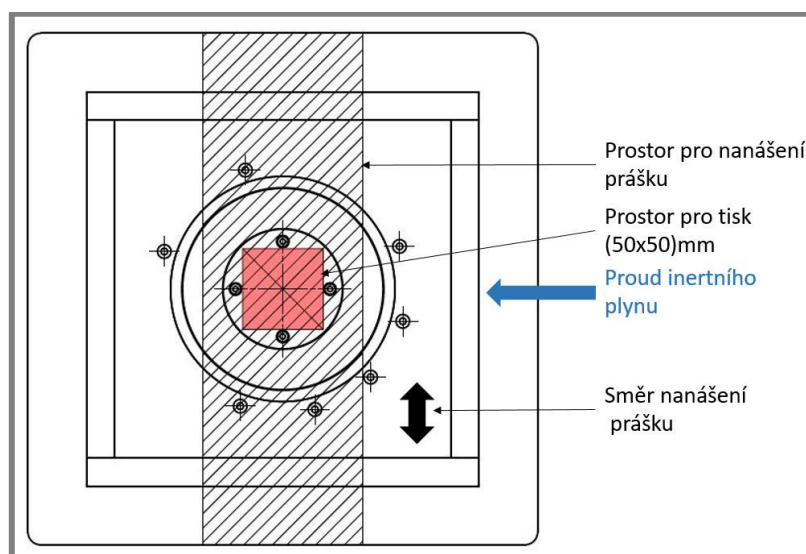
Tab. 7 Cenová kalkulace

Položka	Cena s DPH (Kč)
Výroba součástí z Inconell alloy 718	64 972
Výroba ostatních ocelových dílů	24 000
Izolační materiál Duratec 750 a Monalite M1	5 764
Grafitová těsnění	276
Elektronika	5 400
Cena celkem	100 412

Pro nanášení prášku byl použit posuvný nanášecí systém, který je součástí pracovní komory 3D tiskárny SLM 280HL. Tento nanášec není stavěn do vysokých teplot, pro roztírání prášku používal silikonovou stěrku. Silikonová stěrka byla nahrazena nově navrženou stěrku z korozi-vzdorné oceli 1.4301. Vodiče pro napájení topných patron jsou vyvedeny na stavěcí rovinu, proto nanášec musel být vyvýšen o 13 mm. Vyvýšení nanášece bylo docíleno vložením přesně tvarovaných podložek na úchyty nanášece prášku (obr. 52) a sundáním víka. Prášek bude nanášen do prostoru zobrazeného na obr. 53. Šířka prostoru pro nanášení prášku je 104 mm.



Obr. 52 Úpravy nanášecího zařízení; a) člen pro upevnění; b) podložky levého úchyty; c) levý úchyt; d) ocelová stěrka; e) pravý úchyt; f) podložka a upevňovací člen pravého úchyty



Obr. 53 Prostor nanášení prášku

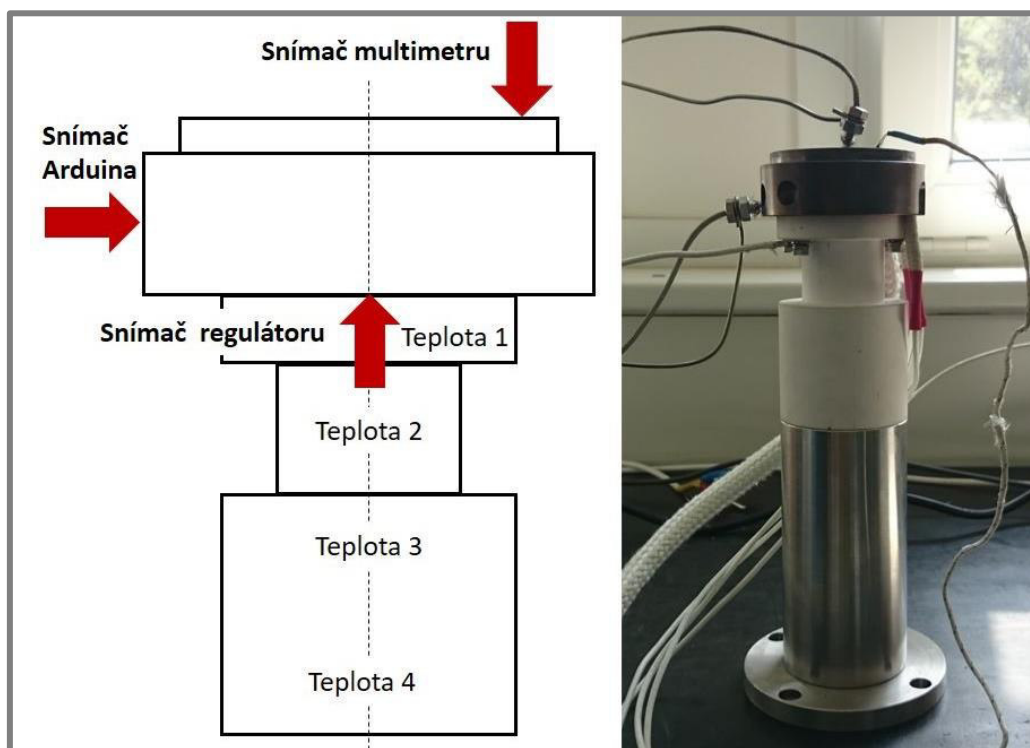
5.6 Testování experimentální komory

Před sestavením a vyhřátím experimentální komory v 3D tiskárně bylo nejprve nutné otestovat funkčnost zařízení. Byla provedena série testů ohřevu samotného pístu a poté byl proveden ohřev zařízení v procesní komoře 3D tiskárny.

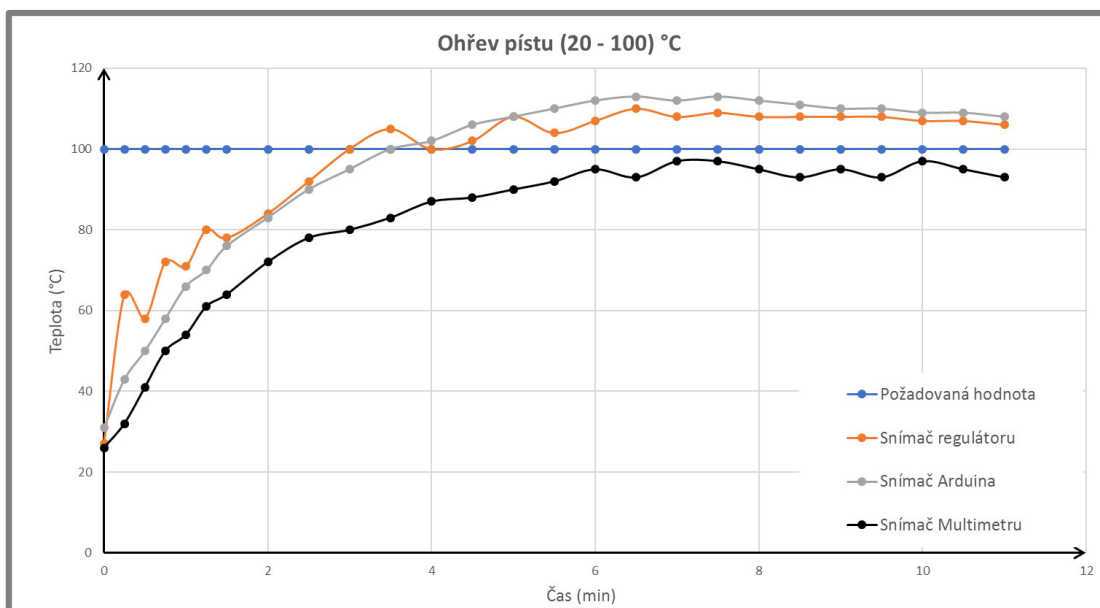
5.6.1 Test ohřevu pístu

Píst byl ohříván třemi topnými patronami a celkovém výkonu 600 W. K měření teploty byly použity tři K termočlánky a teplota byla dotykově snímána na několika místech dle obr. 54. *Snímač regulátoru* byl napojen na PID regulátor, sloužil pro samotnou regulaci teploty ohřevu. *Snímač Arduina* byl kontrolním snímačem, který snímal teplotu topné patrony. *Snímač multimetru* měřil teplotu na povrchu pístu. Test probíhal tak, že na regulátoru byla nastavena požadovaná hodnota teploty. Nejprve byl proveden ohřev z pokojové teploty na 100 °C. Po ustálení teplot na všech snímačích byl píst zahřát na 200 °C, následně na 250 °C a nakonec na 300 °C. Výsledky z měření viz graf. 1 až 4. Z výsledků lze vidět, že PID regulátor postupně řídil ohřev tak, aby došlo jen k minimálnímu přesáhnutí nastavené teploty ohřevu. Řízení bylo prováděno stylem vypnuto, zapnuto, což se projevilo kolísáním teplot během ohřevu. Na *snímači multimetru* byla naměřená teplota vždy nižší než na ostatních snímačích umístěných v blízkosti topných patron. To bylo způsobené teplotními ztrátami.

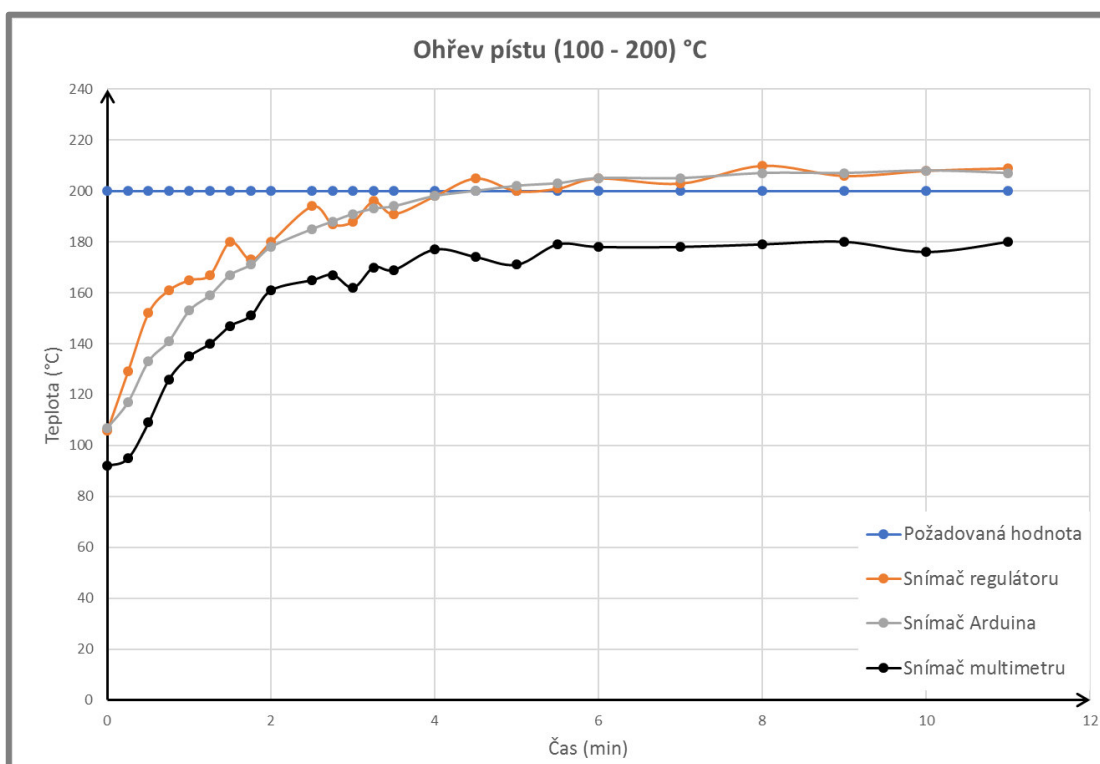
Po skončení testu byla bezdotykovým pyrometrem změřena teplota v místech dle obr. 54, kdy bylo sledováno šíření teploty skrze tepelnou izolaci. V místě *teplota 1* byla naměřena teplota 110 °C, v místě *dva* 70 °C, v místě *tři* 35 °C a v místě *čtyři* 30 °C.



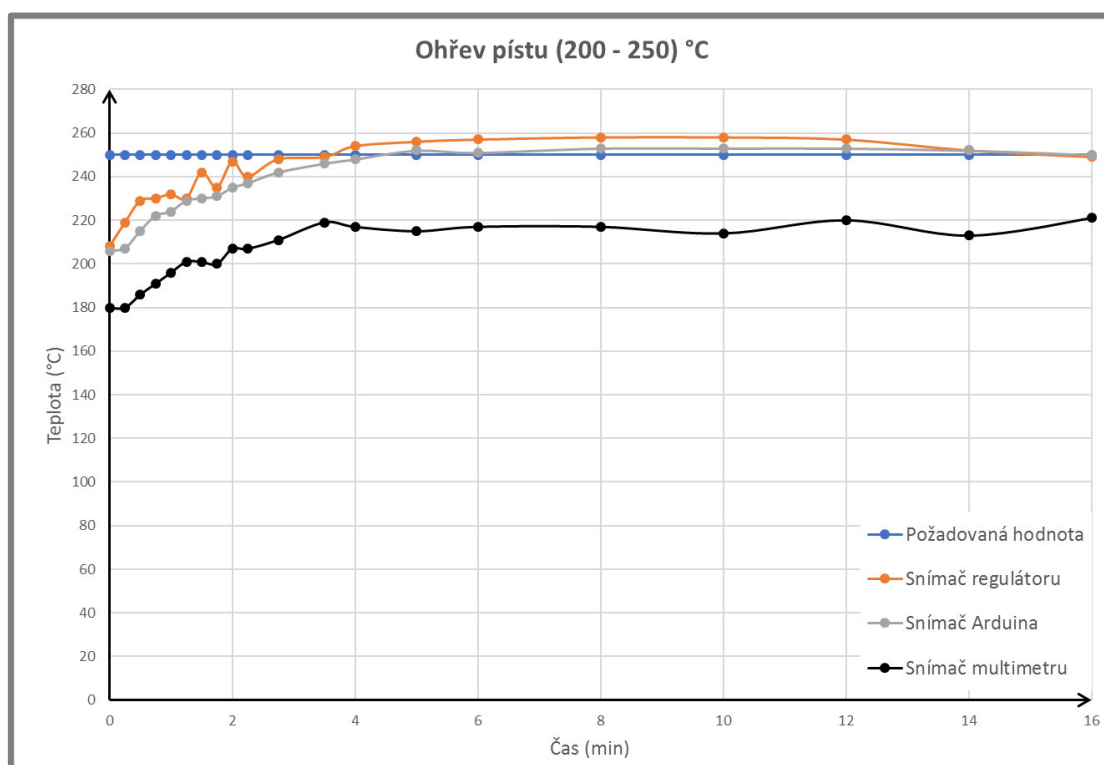
Obr. 54 Test ohřevu pístu



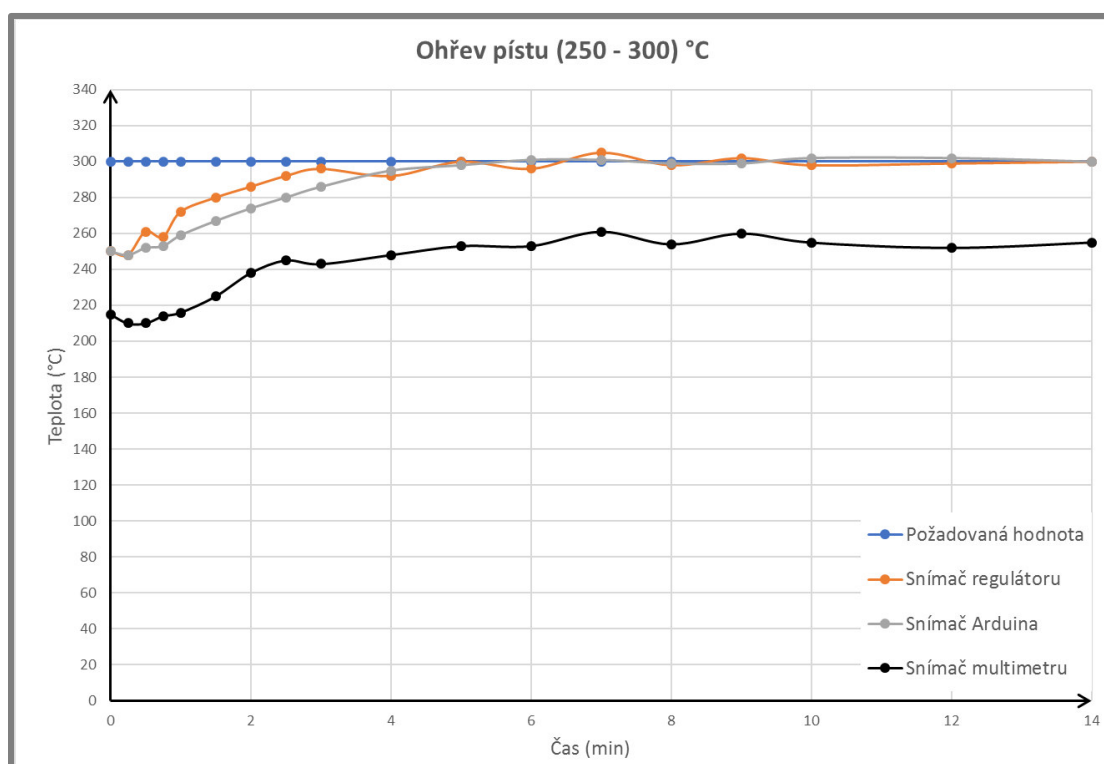
Graf 1 Ohřev pístu (20-100) °C



Graf 2 Ohřev pístu (100-200) °C



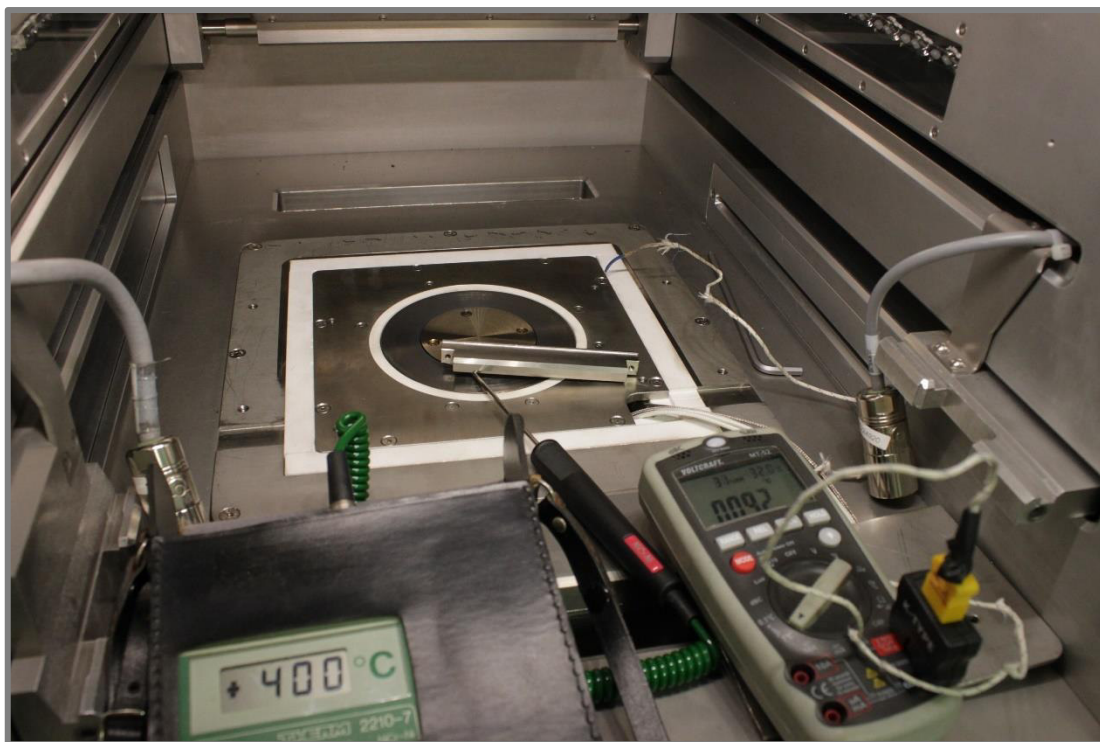
Graf 3 Ohřev pístu (200-250) °C



Graf 4 Ohřev pístu (250-300) °C

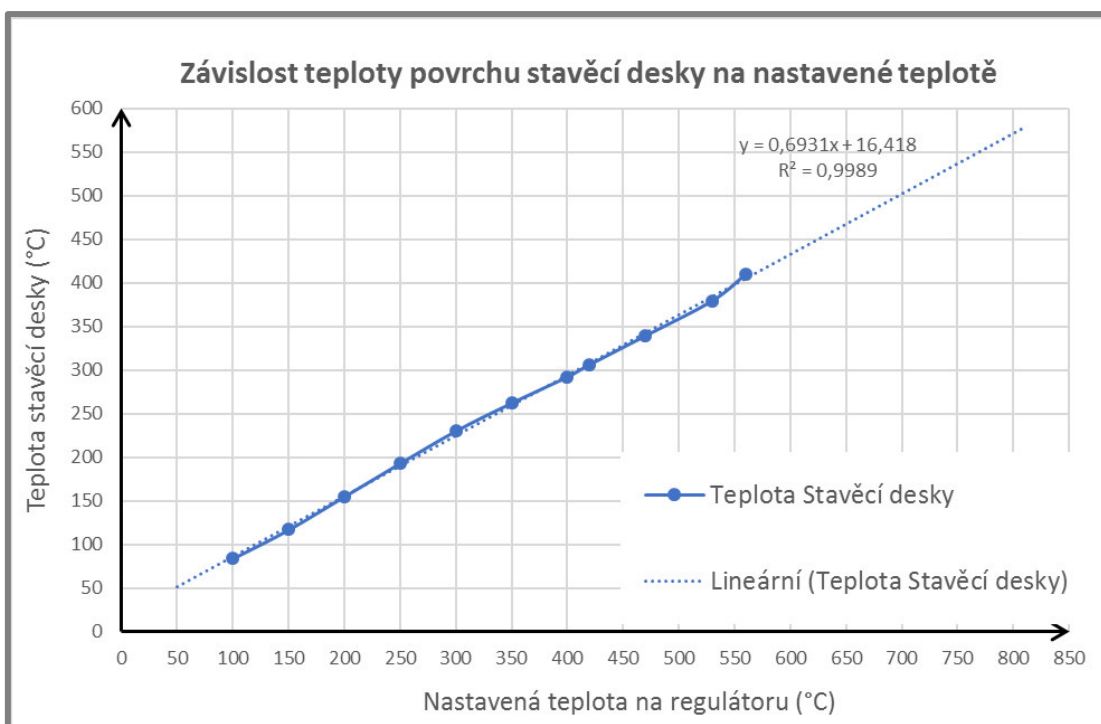
5.6.2 Test ohřevu experimentální komory v tiskárně SLM 280HL

Tento test měl dokázat reálnou použitelnost zařízení. Test probíhal přímo v procesní komoře 3D tiskárny SLM 280HL, do které byla vložena experimentální komora. Na regulátoru byla postupně zvyšována teplota až do doby, než se povrch stavěcí desky ohřál na 400 °C (obr. 55). Vždy po navýšení teploty byla mezi dalším zvyšováním ponechána časová prodleva pro vyrovnání teplot. Teplota stavěcí desky byla měřena dotykovým teploměrem Therm 2210-7 s rozsahem měřících teplot od -200 °C do 1370 °C. Multimetr v tomto testu sloužil pouze pro kontrolu šíření teploty komorou. Teploty 400 °C na stavěcí desce bylo dosaženo při nastavení ohřevu na 560 °C na PID regulátoru. Tato teplota se nacházela v blízkosti topných patron. Vlivem teplotních ztrát byla teplota na povrchu stavěcí desky nižší. Z výsledků testu vyplývá, že mezi hodnotou nastavení ohřevu na regulátoru a reálným ohřevem povrchu stavěcí desky je lineární závislost (graf. 5). Podle tohoto grafu je možné určit teplotu stavěcí desky při nastavení teploty ohřevu na regulátoru. Teploty 400 °C na povrchu stavěcí desky bylo dosaženo po 140 min ohřevu s prodlevami pro vyrovnání teplot.



Obr. 55 Test ohřevu experimentální komory

Po skončení testu bylo zkontrolováno šíření tepla komorou. K měření byl použit multimetr. Na obr. 55 je zobrazeno měření v místě na okraji základní desky, kde teplota dosáhla 92 °C. Na okraji vany bylo naměřeno 41 °C a ve vnitřních prostorách experimentální komory 95 °C.



Graf 5 Závislost teploty povrchu stavěcí desky na nastavené teplotě

6 DISKUZE

V rámci této diplomové práce vzniklo zařízení pro úpravu procesních parametrů 3D tiskárny SLM 280HL. Navržená, sestavená a otestovaná koncepce vyhřívání experimentální komory umožní výzkum obtížně svařitelných materiálů a materiálů s vysokým bodem tání. Předehřevem prášku na vysoké teploty dojde k snížení teplotních gradientů, které jsou nejčastější příčinou vnitřních pnutí a vzniku trhlin v stavěných materiálech. V současné době existuje pouze několik desítek ověřených materiálů technologií SLM, proto je zde prostor pro výzkum dalších materiálů a rozšíření této technologie do více průmyslových odvětví.

Zařízení experimentální komory bylo navrženo na ohřev až do teploty 600 °C. Před samotnou výrobou bylo rozhodnuto z důvodu snížení výrobních nákladů nerealizovat navržený otočný nanášecí prášku. Pro nanášení bude prozatím sloužit upravený posuvný nanášecí, který je součástí procesní komory 3D tiskárny. Jeho úpravy spočívaly v nahrazení silikonové stěrky stěrkou z oceli 1.4301 a celkové nadzvednutí nanášedce, tak aby bylo možné do experimentální komory přivést napájení topných patron. S využitím tohoto systému nanášení prášku bylo rozhodnuto prozatím snížit požadavek z 600 °C na 400 °C na povrchu stavěcí desky, aby nedošlo k jeho poškození. Zařízení je stále připraveno na případné doplnění otočného nanášedce prášku.

Pro ohřev byly zvoleny topné patrony, které jsou v návrhu umístěny do vyhříváního pístu i do vyhříváního válce. Jejich celkový navržený výkon 1600 W. Systém byl navržen pro ohřev na maximální teplotu 600 °C do 20 min. Topné patrony běžně nejsou koncipované do takovýchto teplot, navíc je bylo potřeba umístit do omezeného prostoru, proto byly vyrobeny na zakázku. Pro snížení nákladů a ověření koncepce systému vyhřívání byly koupeny pouze topné patrony pro vyhřívání pístu, jejich celkový topný výkon je 600 W.

Největší komplikací při výrobě byla výroba dílů z niklové slitiny Inconell alloy 718, kde byl problém s vyhotovením dlouhých děr pro topné patrony a závitové díry. Pro ušetření nákladů byly izolační díly vyrobeny svépomocí. Sestavení zařízení a zapojení elektroniky bylo provedeno ve studentské dílně.

Při testování zařízení byl nejprve proveden test ohřevu samotného pístu, kdy byla postupně zvyšována teplota ohřevu až do teploty 300 °C, měřená na snímači PID regulátoru (Obr. 54). Teplota měřená na povrchu pístu bez připevněné stavěcí desky byla při nastavení ohřevu na 300 °C o 40 °C nižší, viz graf. 4. To mohlo být způsobeno špatným přenosem tepla na snímač, který se pouze dotýká povrchu ohříváných součástí a také vzdáleností PID regulátoru, který je umístěn ve vnitřních prostorách dílu těsně u topné patrony. Také dochází k tepelným ztrátám, které ohřívání díl ochlazuje.

Dalším testem byl ohřev v procesní komoře 3D tiskárny SLM 280HL, kam byla experimentální komora vložena. Testem byla prokázána, jak sestavitelnost, tak i funkčnost zařízení, kdy při postupném zvyšování teploty na PID regulátoru bylo dosaženo požadovaných 400 °C na povrchu stavěcí desky. Teploty 400 °C bylo dosaženo při nastavení 560 °C na PID regulátoru. Rozdíl 160 °C je způsoben špatným přestupem tepla na stavěcí desku. Z dat z měření byl vytvořen graf závislosti teploty

povrchu stavěcí desky na nastavené teplotě na PID regulátoru. Z grafu 5 je patrná lineární závislost teploty nastavené na PID regulátoru a teploty na povrchu stavěcí desky. Tato závislost ukazuje, že při požadavku na teplotu ohřevu povrchu stavěcí desky na 600 °C by bylo nutné v dané konfiguraci ohřát topné patrony téměř na 850 °C. Je zde prostor pro optimalizaci rozdílu mezi těmito teplotami, např. zlepšením drsnost povrchu mezi díly stavěcí desky a vyhřívané desky pro lepší přenos tepla, případně použití teplovodivé pasty do takto vysokých teplot.

7 ZÁVĚR

Cílem práce byl návrh, výroba a testování vyhřívané experimentální komory pro předehřev prášku určené pro 3D tisk metodou SLM.

Rešeršní část práce je věnována vlivu procesní teploty a tlaku na 3D tisk aditivními způsoby výroby. V odborných studiích bylo dokázáno, že zvýšená teplota při výrobě součástí technologií SLM vede k výrobě kvalitnějších dílů bez vnitřních zbytkových napětí, díky sníženému teplotnímu gradientu v místě dopadu paprsku laseru a okolním materiálem. Navíc, výrobu lze urychlit. Omezení při zpracování materiálů s vysokým bodem tání plyne z výkonu laseru. Vyhříváním na vysoké teploty je možné zpracovávat materiály s vyšším bodem tání i s méně výkonným laserem.

Hlavní část práce je věnována návrhu experimentální komory, výrobě, zapojení elektroinstalace a testování zařízení. Na začátku této kapitoly byla provedena identifikace zástavbového prostoru, který je pro zařízení k dispozici. Následovalo vytvoření několika koncepčních variant, kde kromě ohřevu bylo uvažováno i se zajištěním přetlaku při procesu stavby. Pro konstrukci byla zvolena varianta vyhřívané experimentální komory s vlastním nanášecem prášku a teplotou ohřevu až na 600 °C. Před samotnou výrobou bylo z finančních důvodů rozhodnuto nerealizovat vlastní nanášec prášku, ale upravit stávající způsob nanášení a snížit maximální teplotu ohřevu na 400 °C.

Výstupem práce je funkční experimentální komora sloužící pro předehřev prášku pro tisk technologií SLM. Zařízení pracuje zcela samostatně nezávisle na 3D tiskárně. Jeho modulárnost umožňuje vložení do tiskárny pouze v případě, kdy je požadavek pro tisk za vysokých teplot předehřevu. Díky experimentální komoře se podařilo teplotu předehřevu zvýšit z původních 200 °C až na teplotu 400 °C. S takto vysokou teplotou předehřevu bude možné studovat vliv vysoké teploty na obtížně svařitelné materiály a materiály s vysokým bodem tání. Experimentální komora je navržena na stavbu dílů na kruhovou platformu o průměru 75 mm. Maximální výška tisknutého dílu je 50 mm. Zařízení dovoluje oproti konkurenčním systémům kontrolovat ohřev v celé výšce tisknuté součásti. Komora obsahuje ověřenou tepelnou izolaci, která chrání okolní rám tiskárny před zvýšenou teplotou.

Doplněním experimentální komory o vlastní nanášec prášku je zde předpoklad pro další zvýšení teploty předehřevu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**8**

- [1] BREMEN, Sebastian. Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal* [online]. 2012, **9**(2), 33-38 [cit. 2016-03-11]. DOI: 10.1002/latj.201290018. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201290018>
- [2] SCHLEIFENBAUM, H. Individualized production by means of high power Selective Laser Melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2010, **2**(3), 161-169 [cit. 2016-03-12]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.03.005. ISSN 17555817. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175558171000012X>
- [3] *SLM Solutions* [online]. 2014 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.stage.slm-solutions.com/>
- [4] ABOULKHAIR, Nesma, Nicola EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **1-4**, 77-86 [cit. 2017-04-17]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000062>
- [5] MERCELIS, Peter. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2006, **12**(5), 254-265 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1108/13552540610707013. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540610707013>
- [6] BUCHBINDER, Damien. Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. *RTejournal* [online]. 2011, (8) [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://www.rtejournal.de/ausgabe8/3158>
- [7] KEMPEN, Karolien. *Lowering thermal gradient in selective laser melting by pre-heating the baseplate* [online]. Austin: KU Leuven, 2013 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/410783/1/Karolien+Kempen_SF2013.pdf
- [8] LIU, Qi. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **222**(8), 61-74 [cit. 2016-03-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.036. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615000862>

- [9] WEIWEI, He. Research on Preheating of Titanium Alloy Powder in Electron Beam Melting Technology. *Rare Metal Materials and Engineering* [online]. 2011, **40**(12), 2072-2075 [cit. 2016-03-30]. DOI: 10.1016/S1875-5372(12)60014-9. ISSN 18755372. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875537212600149>
- [10] *TC4 titanium alloy laser selective melting material additive manufacturing and heat treatment method*. b.r. CN105014073 CN20151508138 20150818. Uděleno 4. 11. 2015. Dostupné také z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=18&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20151104&CC=CN&NR=105014073A&KC=A
- [11] MASMOUNDI, Amal. Investigation of the laser–powder–atmosphere interaction zone during the selective laser melting process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **225**(11), 122-132 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.05.008. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615002083>
- [12] GIESEKE, M. *Selective laser melting of magnesium and its alloys*. Lübeck, 2014.
- [13] MCWILLIAMS, John, HYSINGER a J. BEAMAN. *Design of high temperature process chamber for the selective laser sintering process* [online]. Austin, 1992 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1992/1992-12-McWilliams.pdf>
- [14] *Elotechnik* [online]. Žamberk, 2016 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.elotechnik.cz/>
- [15] GIESEKE, Matthias. *Challenges of Processing Magnesium and Magnesium Alloys by Selective Laser Melting*. Hannover, 2016.
- [16] *Special metals* [online]. USA: Special Metals Corporation, 2015 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: www.specialmetals.com
- [17] *Swiss profile* [online]. Švýcarsko: Swiss profile, 2011 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: www.swissprofile.com
- [18] *Promat Czech Republic* [online]. Praha: Promat, 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: www.web.promatpraha.cz
- [19] *MACH těsnění spol s.r.o.* [online]. Ostrava: MACH těsnění, 2003 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: www.mach-tesneni.cz

- [20] *MatWeb* [online]. Blacksburg, 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: www.matweb.com
- [21] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [22] F. THÜMMLER AND R. OBERACKER., . *An introduction to powder metallurgy*. 1. London: Institute of Materials, 1993. ISBN 978-090-1716-262.
- [23] DONG, L. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, **209**(2), 700-706 [cit. 2016-12-15].
- [24] MILLS, K. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. 1. Cambridge: Woodhead, 2002. ISBN 08-717-0753-5.
- [25] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*. 2., dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [26] *Zboží arkov* [online]. Slatiňany, b.r. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: www.zbozi.arkov.cz

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
SLM	Selective Laser Melting
3D	Trojrozměrný
CAD	Computd aided design
HSS	High speed steel
Fe	Železo
C	Uhlík
Mn	Mangan
Si	Křemík
Cr	Chrom
Mo	Molibden
W	Wolfram
V	Vanad
Zr	Zirkon
O	Kyslík
Y	Yttrium
Nd-YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet
EBM	Electron Beam Melting
Ti	Titan
Al	Hliník
Mg	Magnesium
Ca	Vápník
Zn	Zinek
SLS	Selective Laser Sintering
PTFE	Polytetrafluorethylen
MKP	Metoda konečných prvků
PID	Proporcionální, integrační, derivační
DPH	Dan z přidané hodnoty

Symbol	Jednotka	Veličina
Q	J	Teplo
m	kg	Hmotnost
c	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita
T	K	Teplota
Q _{p12}	J	Teplo pro ohřev pístu
m _p	kg	Hmotnost pístu
c ₇₁₈	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita slitiny Inconell 718
T ₂	K	Teplota na konci ohřevu

T_1	K	Teplota na začátku ohřevu
W_{pp}	W	Výkon topných patron pístu
t_p	s	Doba ohřevu pístu
Q_{V12}	J	Teplo pro ohřev válce
m_v	kg	Hmotnost válce
W_{pv}	W	Výkon topných patron válce
t_v	s	Doba ohřevu válce
R_v	$m \cdot K \cdot W^{-1}$	Odpor proti vedení tepla
λ_{750}	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	Koeficient tepelné vodivosti Duratecu 750
r_1	m	Vnitřní poloměr válce
r_2	m	Vnější poloměr válce
Q_{zv}	W	Tepelné ztráty ve válci
T_{in}	$^\circ C$	Teplota uvnitř válce
T_{out}	$^\circ C$	Teplota vně válce
L_v	m	Délka válce
λ_p	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel teplotní vodivosti prášku
λ_s	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel teplotní pevného materiálu
Φ	-	Relativní porozita prášku
ρ_s	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota pevného materiálu
ρ_p	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota práškového materiálu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

10.1 Seznam obrázků

Obr. 1 Selective laser melting postup [3]	13
Obr. 2 Přehled procesních parametrů v technologii SLM [4]	15
Obr. 3 Vznik zbytkových napětí [5]	16
Obr. 4 Rozměry testovaných vzorků [6]	17
Obr. 5 a) Vliv teploty předehřevu na odklon vzorku s tloušťkou 2 mm od základové desky, b) Vliv teploty předehřevu na tvrdost vzorku [6]	17
Obr. 6 Vzorky z M2 HSS oceli tisknuté bez předehřevu základové desky [7]	18
Obr. 7 Vliv rychlosti skenování, předehřevu a re-meltingu na relativní hustotu dílů z M2 HSS oceli [7]	19
Obr. 8 M2 HSS ocelové vzorky tištěné, vlevo bez technologie re-melting, vpravo s technologií re-melting [7]	19
Obr. 9 Schéma předehřevu s použitím druhého laseru [8]	20
Obr. 10 Vliv výkonu laseru a teploty předehřevu na relativní hustotu vzorků z $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ [8]	21
Obr. 11 Vliv tlaku na single tracky nerezavějící oceli 316L a) 995 mbar b) 500 mbar c) 250 mbar d) 100 mbar e) 10 mbar f) 1 mbar [11]	22
Obr. 12 Magnesiové singl track čtvercové vzorky [12]	23
Obr. 13 Modifikovaná tiskárna SLM 125HL [12]	23
Obr. 14 Magnesiové vzorky tištěné v přetlakové komoře [12]	24
Obr. 15 SLM proces při zpracovávání magnesia [12]	24
Obr. 16 a) Magnesiový díl zpracovaný technologií SLM b) Oslabení nárazové vlny okolním tlakem [12]	25
Obr. 17 Konstrukce vyhřívané komory [13]	26
Obr. 18 Ochrana laserového okna [13]	27
Obr. 19 Vyhřívání podložka od společnosti SLM Solutions [3]	27
Obr. 20 3D tiskárna SLM 280HL [3]	28
Obr. 21 Vlevo: redukční rámeček; Vpravo prostor pro návrh experimentální komory	28
Obr. 22 Rozložený nanášec prášku	29
Obr. 23 Tiskárna SLM 280HL	31
Obr. 24 CAD model pracovního prostoru 3D tiskárny SLM 280	32
Obr. 25 Schéma vyhřívané komory	33
Obr. 26 Schéma přetlakové a temperované experimentální komory	34
Obr. 27 Model vyhřívané a temperované experimentální komory	35
Obr. 28 Schéma možných uložení nanášec prášku.	36
Obr. 29 Čtvrtinový řez modelem komory usazené v rámu 3D tiskárny	38
Obr. 30 Experimentální komora vložená v pracovním prostoru tiskárny SLM 280HL	39
Obr. 31 Schéma konstrukčního řešení experimentální komory	40
Obr. 32 z leva: Píst; Střed komory; Vana	41
Obr. 33 Montáž experimentální komory	42
Obr. 34 Lisované grafitové kroužky z expandovaného grafitu	45
Obr. 35 Systém vyhřívání	46
Obr. 36 Teplotní deformace Stavěcí desky v radiálním směru	48

Obr. 37 Teplotní deformace Vyhřívání válce v radiálním směru	48
Obr. 38 Teplotní deformace Vyhřívání válce v radiálním směru	49
Obr. 39 Teplotní deformace Vyhřívání válce v axiálním směru	50
Obr. 40 Čtvrtinový model komory	53
Obr. 41 Ohřev po 20 min při vyhřívání válce i pístu	54
Obr. 42 Ohřev po 60 min při vyhřívání válce i pístu	55
Obr. 43 Ohřev po 20 min při vyhřívání pouze pístu	56
Obr. 44 Čtvrtinový model komory s práškem	57
Obr. 45 MKP ověření ohřevu prášku	58
Obr. 46 Systém ohřevu a regulace	59
Obr. 47 Otočný nanášecí prášku	60
Obr. 48 Prostor pro nanášení prášku	60
Obr. 49 Konstrukce nanášeče prášku	61
Obr. 50 Systém dávkování prášku	62
Obr. 51 Realizace experimentální komory	63
Obr. 52 Úpravy nanášecího zařízení	64
Obr. 53 Prostor nanášení prášku	64
Obr. 54 Test ohřevu pístu	65
Obr. 55 Test ohřevu experimentální komory	68

10.2 Seznam grafů

Graf 1 Ohřev pístu (20-100) °C	66
Graf 2 Ohřev pístu (100-200) °C	66
Graf 3 Ohřev pístu (200-250) °C	67
Graf 4 Ohřev pístu (250-300) °C	67
Graf 5 Závislost teploty povrchu stavěcí desky na nastavené teplotě	69

11 SEZNAM TABULEK

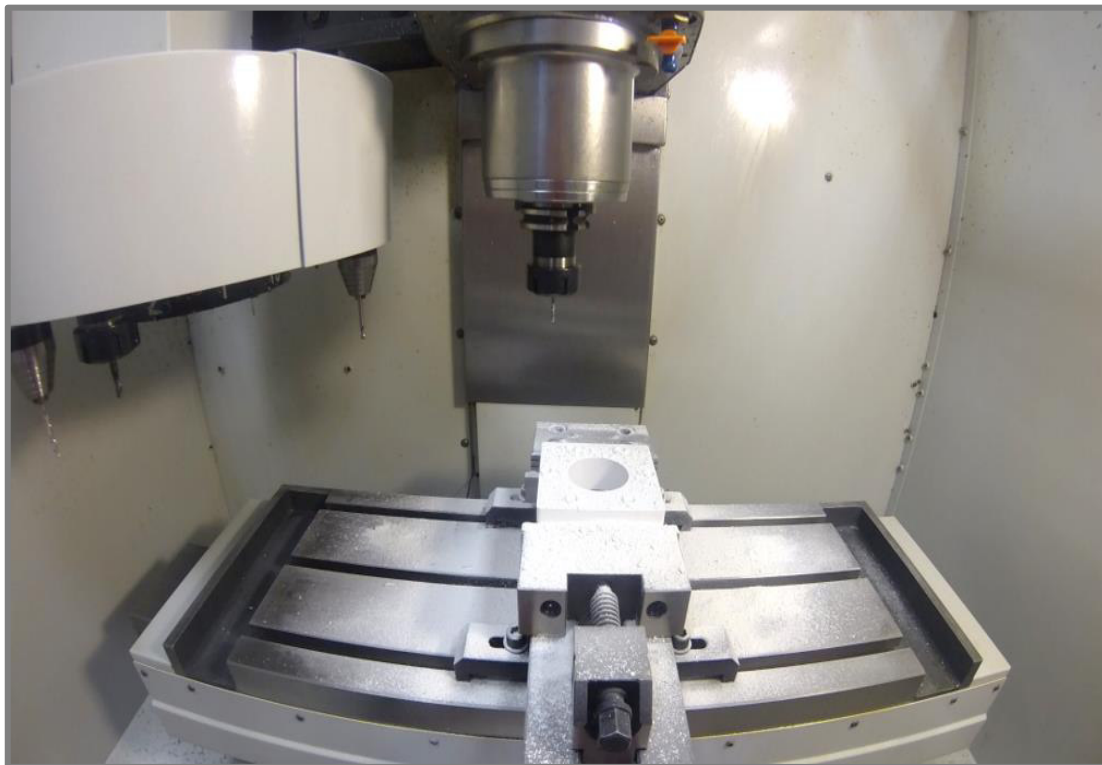
Tab. 1 Hmotnostní složení prvků v prášku rychlořezné oceli M2 [7]	18
Tab. 2 Výrobní parametry při zpracování ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ prášku metodou SLM [8]	20
Tab. 3 Vlastnosti ocelí v závislosti na teplotě Inconel alloy 718 [16] a 1.4301 [17]	43
Tab. 4 Vlastnosti izolačních materiálů v závislosti na teplotě [18]	44
Tab. 5 Roztažnost stavební desky z různých materiálů	47
Tab. 6 Vlastnosti materiálu TiAl6V4 [24]	57
Tab. 7 Cenová kalkulace	63

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

Příloha 1	Fotodokumentace
Příloha 2	Výkresová dokumentace
Příloha 3	Elektrické schéma zapojení
Příloha 4	Digitální data

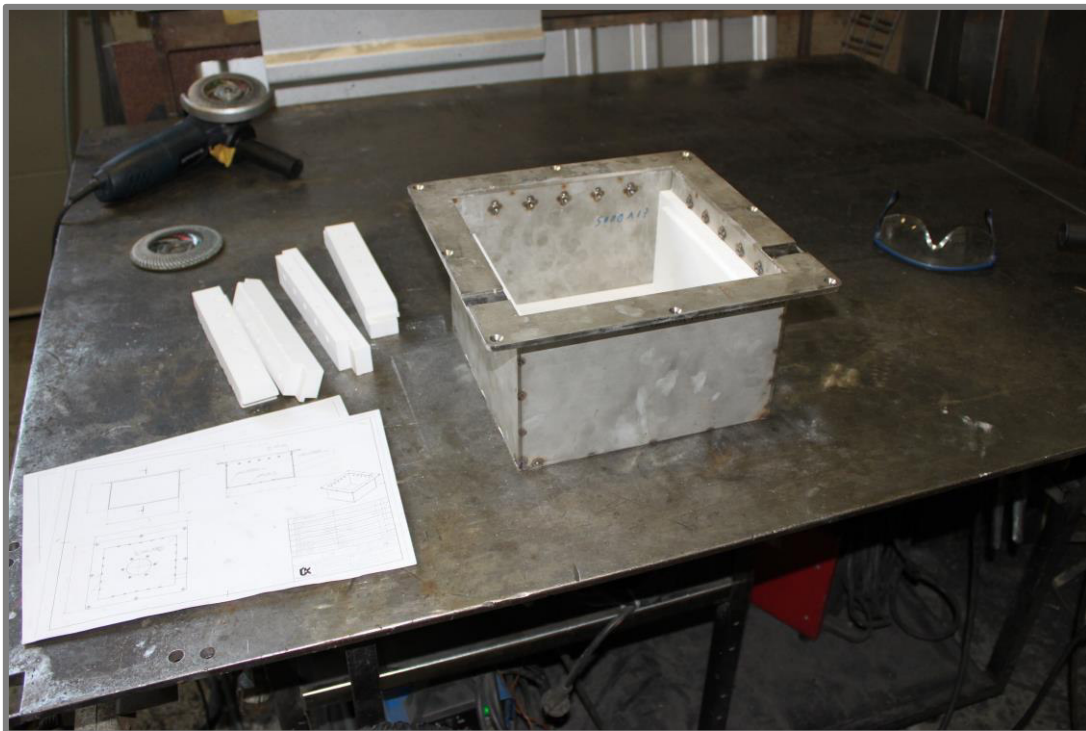
PŘÍLOHA 1: FOTODOKUMENTACE



Fotodokumentace 1 Výroba izolačních dílů



Fotodokumentace 2 Díly experimentální komory



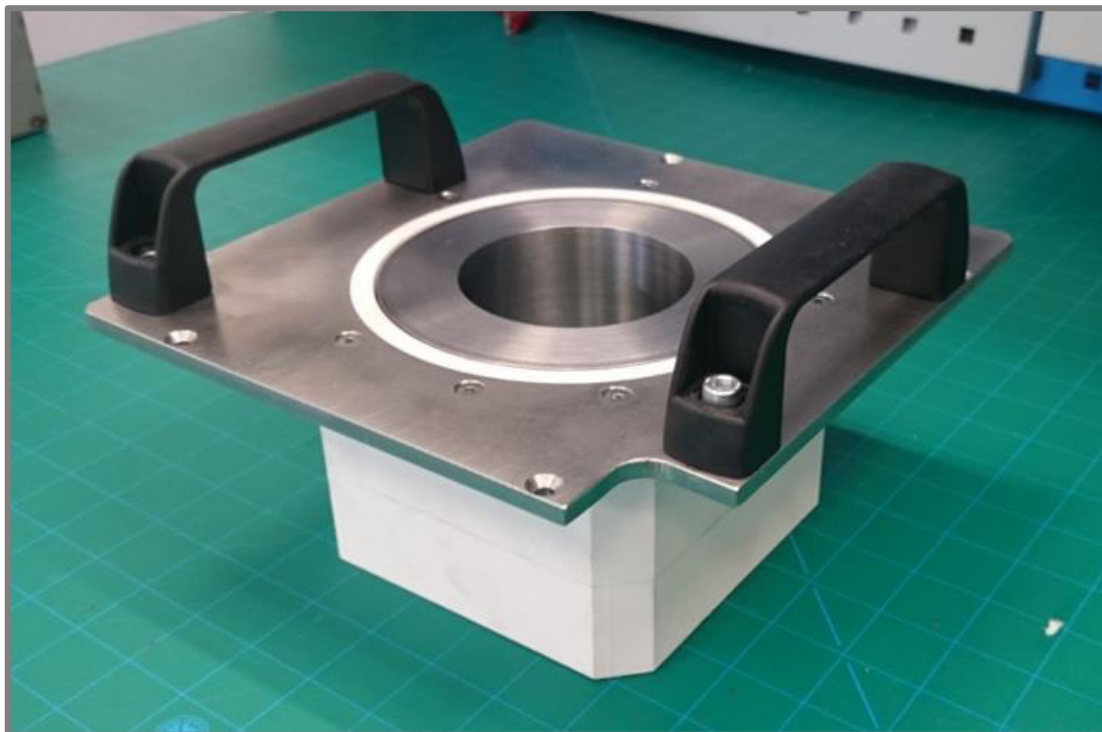
Fotodokumentace 3 Skládání vyzdívky



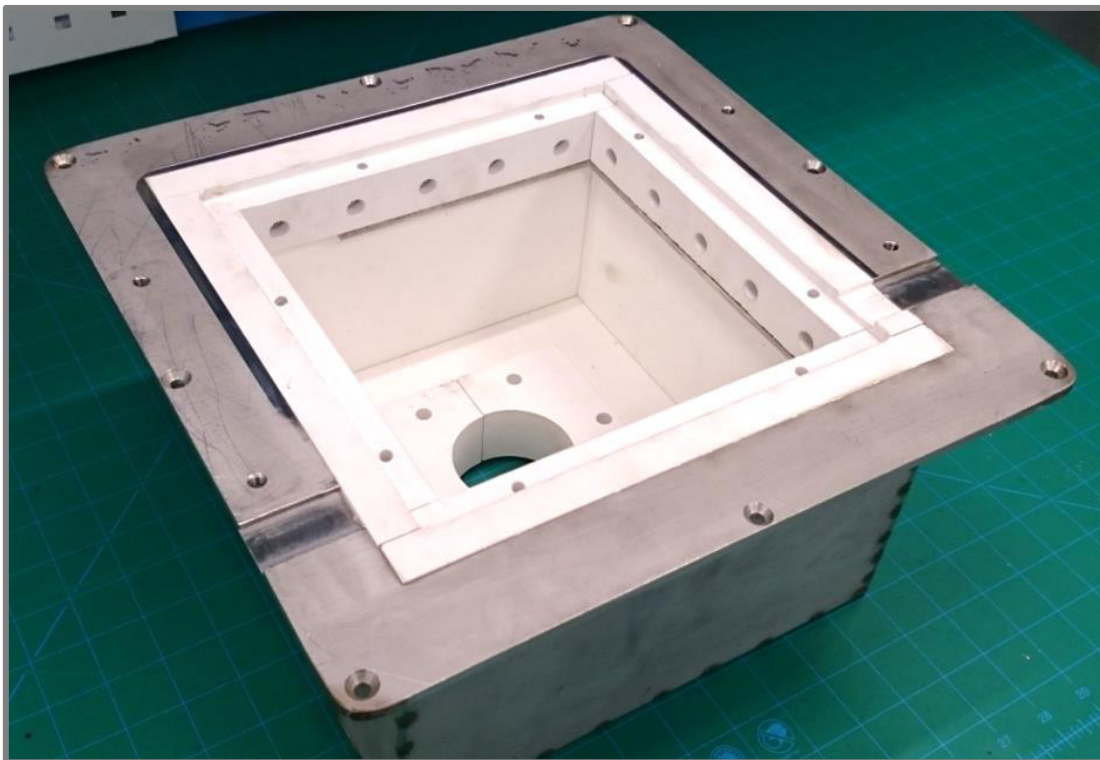
Fotodokumentace 4 Frézování drážky do vany pro základní desku



Fotodokumentace 6 Sestavený píst



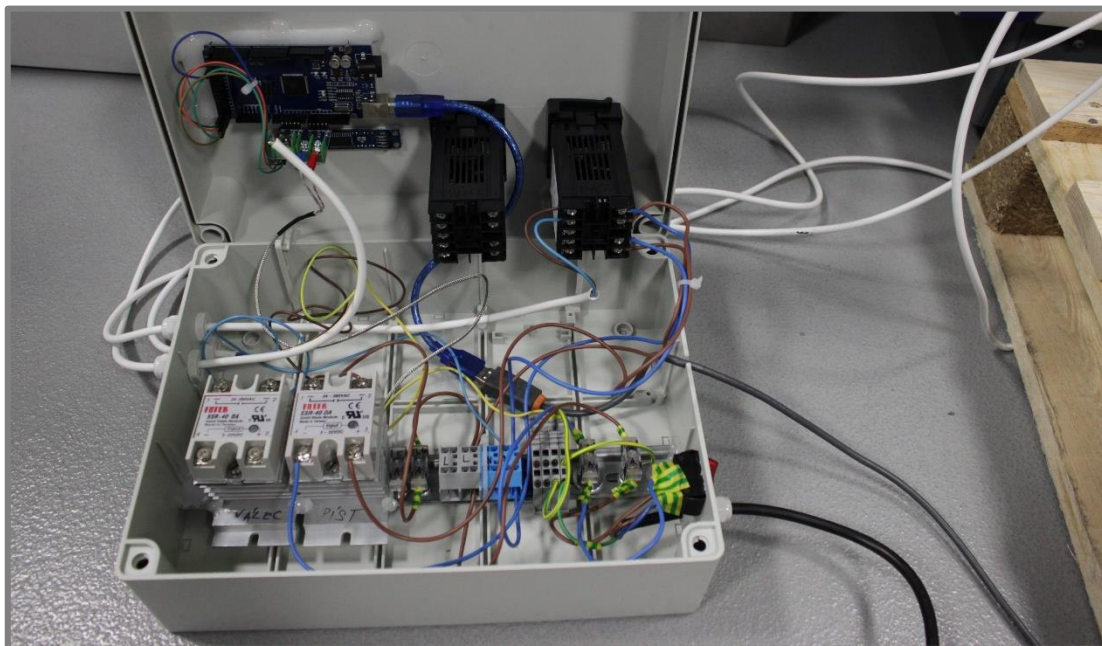
Fotodokumentace 5 Sestavený střed experimentální komory



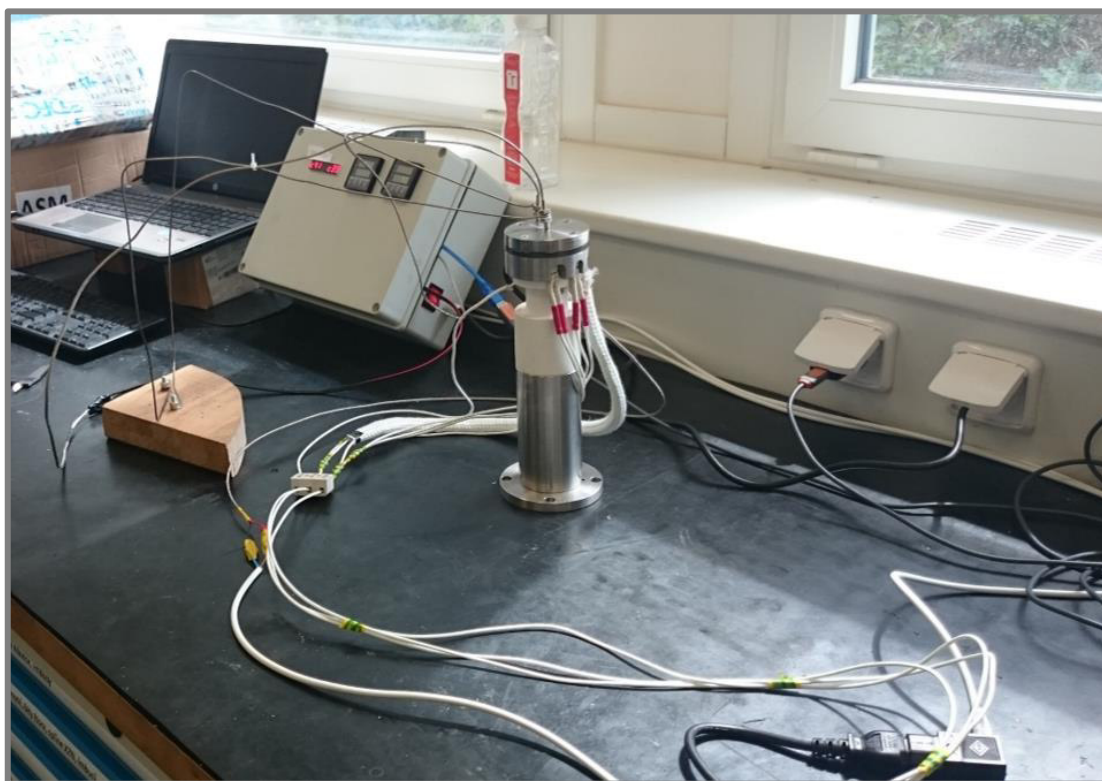
Fotodokumentace 8 Sestavená vana



Fotodokumentace 7 Sestavená experimentální komora



Fotodokumentace 9 Zapojení elektroniky



Fotodokumentace 10 Test ohřevu pístu



Fotodokumentace 12 Průchodka ve dveřích komory 3D tiskárny pro připojení napájení topných patron



Fotodokumentace 11 Píst vložený v procesní komoře 3D tiskárny



Fotodokumentace 13 Vkládání vany do procesní komory



Fotodokumentace 14 Experimentální komora vložená do procesní komory 3D tiskárny
